

# **Ledien hyödyntäminen teollisuusvalaistuksessa**

**Kati Harjula**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.10.2016.

**Työn valvoja:**

Prof. Liisa Halonen

**Työn ohjaajat:**

TkT Leena Tähkämö

Jussi Kairi

Tekijä: Kati Harjula

Työn nimi: Ledien hyödyntäminen teollisuusvalaistuksessa

Päivämäärä: 4.10.2016

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 8+84

Elektroniikan laitos

Professuuri: Valaistustekniikka ja sähköinen talotekniikka

Työn valvoja: Prof. Liisa Halonen

Työn ohjaajat: TkT Leena Tähkämö, Jussi Kairi

Loistediodien eli ledien käyttö on yleistynyt huomattavasti viime vuosina kaikilla valaistuksen osa-alueilla. Tehokkuuden kasvaessa ja hinnan laskiessa ledit ovat yleistyneet myös katu- ja teollisuusvalaistuksessa. Teollisuuden hankalissa ympäristöissä erityisesti ledien pitkä käyttöikä on merkittävä tekijä.

Tässä diplomityössä tutustuttiin teollisuuden erilaisiin valaistus- ja ohjausvaihtoehtoihin ja tutkittiin tutkimuskohteena olleen paperitehtaan valaistuksen nykytilannetta valaistusvoimakkuus- ja luminanssimittauksin sekä DIALux-mallinnoisin. Lisäksi kohteeseen suunniteltiin uusi ledivalaistus erilaisilla valaisinvaihtoehtoilla ja laskettiin näille mahdollisimman tarkat elinkaarikustannusarviot sekä takaisinmaksuajat.

Elinkaarikustannusarvioiden perusteella paperitehtaan varastotilassa yksinkertaisella läsnäolo-ohjauksella sekä ledivalaisimilla energian kulutusta voitaisiin vähentää yli 80 %. Konesalin valaistuksen nykyisestä energiankulutuksesta puolestaan olisi mahdollista säästää 70 % 30 vuoden laskenta-ajalla pelkästään siirtymällä ledivalaistukseen nykyisten monimetallivalaisinten sijaan. Järkevästi suunnitellulla valaistuksen ohjauksella näitä säästöjä on mahdollista vieläkin kasvattaa.

Kaiken kaikkiaan voidaan tämän tutkimuksen perusteella sanoa, että paperitehtaassa elinkaarensa päässä olevan valaistuksen saneeraaminen ledeillä on kokonaistaloudellisesti kannattavaa.

Avainsanat: LED, teollisuusvalaistus, valaistuksen ohjaus, paperiteollisuus, DIALux, elinkaarikustannus, takaisinmaksuaika, DALI, KNX



Author: Kati Harjula

Title: Utilising LEDs in industrial lighting - Case study

Date: 4.10.2016

Language: Finnish

Number of pages: 8+84

Department of Electronics

Professorship: Illumination engineering

Supervisor: Prof. Liisa Halonen

Advisors: D.Sc. (Tech.) Leena Tähkämö, Jussi Kairi

In recent years, Light-Emitting Diodes (LEDs) have become increasingly common in all areas of lighting. While luminous efficacy increases and unit price of LEDs decreases, their use in street and industrial lighting is also becoming more common. In the demanding environments of industrial plants, particularly the long life span of LEDs is a remarkable factor.

This thesis investigated the economical profitability of using LED luminaires when renewing the lighting in a paper factory. First, different alternative solutions in lighting and its control were studied and then life cycle costs and payback times were calculated as accurately as possible using three different methods.

The calculations in this thesis showed that by using smart control and appropriate LED luminaires it is possible to save over 80 % of the energy consumed today in the warehouse of the factory. In the machine room, the designed LED solutions without control would save 70 % of the energy consumed now and with smart control the energy consumption would decrease even further. Also, with LEDs, the life span of the lighting is longer and thus the maintenance interval is longer as well. The analysis concluded that renewing metal halide lighting at the end of its life span with LEDs is economically profitable.

Keywords: LED, industrial lighting, lighting control, paper factory, DIALux, life cycle cost, payback time, DALI, KNX

## Esipuhe

Ensiksi kiitän Professori Liisa Halosta sekä ohjaajiani Leena Tähkämöä ja Jussi Kairia hyvästä ohjauksesta ja arvokkaasta palautteesta. Jussille ja Pöyrylle kiitokset kiinnostavasta aiheesta ja mahdollisuudesta tehdä diplomityötä. Lisäksi kiitän perhettäni ja ystäviäni tuesta koko prosessin ajan sekä erityisesti Ottoa ja Minnaa vertaistuesta diplomityössä. Minnalle myös iso kiitos mittausavusta tehtaalla. Suuret kiitokset työn oikoluvusta Anulle sekä Florianille.

Otaniemi, 4.10.2016

Kati M. Harjula

# Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>viii</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Teollisuusvalaistus</b>	<b>2</b>
2.1 Valonlähteet ja valaisimet . . . . .	2
2.1.1 Halogeenilamput . . . . .	2
2.1.2 Elohopeahöyrylamput . . . . .	3
2.1.3 Loistelamput . . . . .	3
2.1.4 Monimetallilamput . . . . .	4
2.1.5 Suurpainenatriumlamput . . . . .	4
2.1.6 Ledit . . . . .	4
2.1.7 Vertailu . . . . .	5
2.2 Valaistuksen ohjaus ja säätö . . . . .	8
2.2.1 Vakiovalosäätö . . . . .	8
2.2.2 Läsnaolo- ja päivänvalo-ohjaus . . . . .	8
2.2.3 Analoginen 1–10 V -ohjaus . . . . .	8
2.2.4 Suora painikeohjaus . . . . .	9
2.2.5 DALI . . . . .	9
2.2.6 KNX . . . . .	10
2.2.7 C2 SmartLight – langaton ohjaus . . . . .	10
2.2.8 Philips GreenWarehouse – langaton ohjaus . . . . .	10
<b>3 Elinkaarikustannukset ja kannattavuus</b>	<b>11</b>
3.1 Elinkaarikustannusarvio . . . . .	11
3.2 Takaisinmaksuaika . . . . .	12
<b>4 Case-tutkimuksen mittaukset</b>	<b>14</b>
4.1 Valaistuksen nykytila . . . . .	14
4.2 Mittaukset ja laskelmat . . . . .	15
4.2.1 Valaistusvoimakkuus . . . . .	16
4.2.2 Heijastussuhde . . . . .	18
4.2.3 Luminanssi ja häikäisy . . . . .	19
4.2.4 Värilämpötila ja värintoistoindeksi . . . . .	22
4.3 Nykyisen asennuksen mallinnus . . . . .	22
4.3.1 Paperisali . . . . .	23
4.3.2 Moottorivarasto . . . . .	26

4.4	Sähkönkulutus . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Case-tutkimuksen valaistussuunnitelmat</b>	<b>32</b>
5.1	Paperisali PK3 . . . . .	32
5.1.1	Valittujen valaisinten esittely . . . . .	32
5.1.2	Valaistuksen säätö . . . . .	36
5.2	Moottorivarasto . . . . .	36
5.2.1	Valittujen valaisinten esittely . . . . .	37
5.2.2	Valaistuksen säätö . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Tulokset</b>	<b>42</b>
6.1	Paperisali . . . . .	42
6.1.1	Energiankulutuslaskelmat . . . . .	42
6.1.2	Elinkaarikustannuslaskelmat . . . . .	44
6.1.3	Takaisinmaksuaika . . . . .	45
6.2	Moottorivarasto . . . . .	45
6.2.1	Energiankulutuslaskelmat . . . . .	45
6.2.2	Elinkaarikustannuslaskelmat . . . . .	47
6.2.3	Takaisinmaksuaika . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>50</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Pohjapiirustukset ja valaisinten paikat</b>	<b>53</b>
A.1	PK3 paperisali . . . . .	53
A.2	Moottorivarasto . . . . .	54
<b>B</b>	<b>Valaistusvoimakkuusmittausten mittauspisteet</b>	<b>55</b>
<b>C</b>	<b>Valaistusvoimakkuusmittausten mittautulokset</b>	<b>58</b>
<b>D</b>	<b>Heijastussuhdemittausten mittautulokset</b>	<b>61</b>
<b>E</b>	<b>Luminanssimittausten mittautulokset ja laskelmat</b>	<b>62</b>
<b>F</b>	<b>Vanhan asennuksen DIALux-malli ja tulokset</b>	<b>63</b>
F.1	DIALux-mallinnuksen tulokset paperisalissa . . . . .	63
F.2	DIALux-mallinnuksen tulokset moottorivarastossa . . . . .	65
<b>G</b>	<b>Uusien valaistussuunnitelmien DIALux-mallit ja tulokset</b>	<b>68</b>
G.1	Paperisali PK3 . . . . .	68
G.2	Moottorivarasto . . . . .	71

<b>H Elinkaarikustannuslaskelmat</b>	<b>75</b>
H.1 Elinkaarikustannusten laskentataulukot . . . . .	75
H.2 Tulokuvaajat - Paperisali PK3 . . . . .	80
H.3 Tulokuvaajat - Moottorivarasto . . . . .	82

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

$\bar{E}_m$	Valaistusvoimakkuus
$\bar{E}_{max}$	Maksimivalaistusvoimakkuus
$\bar{E}_{min}$	Minimivalaistusvoimakkuus
$\bar{E}_{pysty}$	Pystysuora keskimääräinen valaistusvoimakkuus hyllyjen etureunassa
$E_\rho$	Valaistusvoimakkuus mittari pintaan päin suunnattuna
MF	Valaistuksen alenemakerroin
$T_a$	Ympäristön lämpötila
$U_d$	Valaistusvoimakkuuden tasaisuus
$\rho$	Heijastussuhde

## Lyhenteet

DALI	Digitaalinen valaistuksen ohjausväylä (engl. Digital Addressable Lighting Interface)
DOE	Yhdysvaltain energiaministeriö (U.S. Department of Energy)
HPS	Suurpainenatrium (engl. High Pressure Sodium)
LCC	Elinkaarikustannus (engl. Life Cycle Cost)
LED	Loistediodi (engl. Light-Emitting Diode)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (engl. Pulse Width Modulation)
$R_a$ -indeksi	Värintoistoindeksi
RF	Radiotaajuus (engl. Radio Frequency)
SPN	Suurpainenatrium
UGR	Häikäisyindeksi (engl. Unified Glare Rating)
UV	Ultravioletti

# 1 Johdanto

Teollisuuden hallivalaistuksessa on perinteisesti käytetty elohopea-, suurpainenatrium- tai monimetallilampuilla varustettuja valaisimia. Nämä lamput antavat tarpeeksi valovirtaa ja kestävät hyvin äärimmäisiäkkin olosuhteita, kuten korkeita lämpötiloja. EU:n asettaessa rajoja valaistuksen energiatehokkuudelle [1], ovat teollisuuslaitoksetkin joutuneet miettimään vaihtoehtoja nykyisille valaistusratkaisuilleen.

Ledit ovat viime vuosina kehittyneet huimaa vauhtia ja niiden hinta on laskenut selvästi. Ledien valotehokkuus on noussut jo monien perinteisempien valonlähteiden yläpuolelle ja ledejä käytetäänkin jo paljon esimerkiksi katuvalaistuksessa. Teollisuusvalaistuksen näkökulmasta erityisesti ledien energiatehokkuus ja pitkä polttoikä kiinnostavat.

Tässä työssä case-tutkimuksen kohteena on Sappi Ltd:n Kirkniemen paperitehtaan yhden paperikonesalin sekä moottorivaraston valaistus. Kohteen valaisinkanta on osittain jo hyvin vanhaa, jopa 12 vuotta, ja valaistuksen laatu on laskenut huomattavasti. Ongelmana kohteessa on erityisesti paperisalin valaistuksen huolto korkean tilan ja ympäri vuoden käynnissä olevien koneiden vuoksi. Tästä syystä suunniteltu neljän vuoden huoltoväli on ylittynyt huomattavasti ja nykyinen valaistus on päässyt huonoon kuntoon. Tätä ongelmaa yritetään ratkaista vaihtamalla valaistus pitkäikäisempään lediratkaisuun.

Tässä työssä tarkastellaan, onko teollisuusvalaistuksen saneeraus ledeillä tällä hetkellä kokonaistaloudellisesti kannattavaa. Työn tavoitteena on tutkia ledien hyödyntämistä paperiteollisuuden konosalivalaistuksessa, tutkia ja verrata elinkaarikustannuksia sekä lisäksi valaistuksen ohjauksella ja himmennyksellä saavutettavia energiansäästöjä. Samalla selvitetään myös valaistuksen ja sen ohjauksen mahdollistamia energiansäästöjä varastotilassa.

Nykyisen valaistuksen tilaa arvioidaan sekä mittaamalla että DIALux-ohjelmistolla mallintamalla. Uudet valaistusratkaisut mallinnetaan DIALux-ohjelmistolla. Elin-kaarikustannuksia ja takaisinmaksuaikaa arvioidaan sekä yleisillä laskukaavoilla, Motivan tarjoamalla valmiilla VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla [2] että suoralla kumulatiivisten kustannusten laskennalla. Ohjauksen toiminnasta tehdään alustava suunnitelma, mutta tarkempi ohjausjärjestelmän tai johdotuksen käytännön suunnittelu ei sisälly tähän työhön.

Työn rakenne on seuraavanlainen. Luvussa 2 esitellään teollisuusvalaistuksessa yleisesti käytettyjä valonlähteitä sekä valaistuksen ohjausmahdollisuuksia. Tämän jälkeen, luvussa 3 selostetaan elinkaarikustannus- ja kannattavuuslaskelmiin tarvittavat tutkimusmenetelmät. Tutkimuskohteeseen ja sen nykyiseen valaistukseen tutustutaan luvussa 4 ja luvussa 5 esitellään uudet valaistussuunnitelmat. Luvussa 6 esitetään laskelmien tulokset ja vertaillaan uusien ratkaisujen kannattavuutta nykyiseen ratkaisuun nähden. Lopuksi luvussa 7 vielä tarkastellaan saatuja tuloksia, niiden merkittävyyttä ja luotettavuutta sekä esitetään johtopäätökset ja yhteenveto.

## 2 Teollisuusvalaistus

Teollisuuden valaistustarpeet eroavat usein paljonkin esimerkiksi toimistojen, kotien tai kauppojen valaistustarpeista. Teollisuusvalaistuksen määrittäviä päätekijöitä ovat korkeat ja laajat tilat, joihin vaaditaan paljon valoa usein ympäri vuorokauden. Tiloja karakterisoivat myös äärimmäiset lämpötilat, nopea liike, kaasut, lika ja pöly sekä vaaralliset aineet. Teollisuuden työtehtävät ovat usein vaikeita, vaarallisia ja vaativia ja siksi soveltuva valaistus on avainasemassa. Kyseessä oleva tehtävä myös määrittää sopivan valaistuksen tyyppin – suoran tai epäsuoran – sillä joissain tapauksissa suoran valaistuksen aiheuttamalla häikäisyllä voi olla vakavia seurauksia. Lisäksi monissa työtehtävissä valaistuksen tasaisuus on tärkeää. [3, s. 30.1–3]

Sisävalaistusstandardissa SFS-EN 12464-1 [4] on määritelty teollisuusvalaistuksen määrälliset ja laadulliset vaatimukset erilaisille tiloille ja tehtäville. Valaistusta suunniteltaessa tulee noudattaa näitä ohjearvoja.

Tässä luvussa esitellään teollisuudessa tavallisimmin käytetyt valonlähteet sekä ohjausratkaisut ja vertaillaan niiden ominaisuuksia.

### 2.1 Valonlähteet ja valaisimet

Teollisuudessa valonlähteiltä vaaditaan hyvää valotehokkuutta, pitkää polttoikää ja tarkkuutta vaativissa tehtävissä hyvää värintoistoa. Tavallisimmin käytettyjä valonlähteitä ovat loistelamput, elohopea- ja monimetallilamput, sekä suurpainenatriumlamput niiden suuren valotehokkuuden vuoksi. Viime vuosina ledivalaisimet ovat kehittyneet huomattavasti ja niiden valotehokkuus on noussut monissa sovelluksissa muita valonlähteitä suuremmaksi [5]. Tämän kehityksen myötä, ledit ovat nyt hyviä vaihtoehtoja perinteisille valonlähteille myös teollisuusvalaistuksessa.

#### 2.1.1 Halogeenilamput

Halogeenilamppu on hehkulamppu, jonka täytöskaasuun on lisätty halogeenia. Sopivissa lampun sisäisissä olosuhteissa, saadaan aikaan kiertoprosessi volframin ja halogeenin välillä. Hehkulangan volframi höyrystyy ja osa höyrystyneestä volframista siirtyy lähelle kuvun seinämiä. Hehkulangan ja lampun kuvun välillä, missä lämpötilaolosuhteet ovat sopivat, volframi ja halogeeni yhdistyvät. Syntynyt molekyyli palautuu täytöskaasuvirtauksen mukana hehkulangan luo ja hajoaa, jolloin volframi kerrostuu takaisin hehkulankaan ja halogeeni vapautuu käytettäväksi uuteen kiertoprosessiin. [6, s. 194–204]

Suuritehoiset halogeenilamput ovat kaksikantaisia ja niitä on käytetty paljon esimerkiksi valonheittimissä. [7, s. 117] Näiden lamppujen teho on tyypillisesti välillä 100–2 000 W, valotehokkuus vaihtelee 12–35 lm/W välillä ja polttoikä on 2 000–4 000 tuntia. Kytettäessä lampun ottama virta on noin kymmenen kertaa sen nimellisvirta ja tämän virtapiikin aiheuttama hehkulangan nopea lämpeneminen heikentää hehkulankaa. Kytkentöjen määrä vaikuttaa siis merkittävästi lampun polttoikään. Halogeenilamppujen värilämpötila vaihtelee hehkulangan lämpötilasta riippuen 2 800–3 000 K välillä ja värintoistoindeksi on 100. Halogeenilampun



tuottama säteily sisältää paljon enemmän UV-säteilyä kuin tavallisen hehkulampun tuottama säteily, ja erilaisia suodattimia käytetään vähentämään tätä haitallista säteilyä. Lisäksi halogeenilamput syttyvät välittömästi ja ovat himmennettävissä. [8] Halogeenien maksimikäyttölämpötila on  $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja siksi niitä käytetään paljon esimerkiksi saunatiloissa. [9]

### 2.1.2 Elohopeahöyrylamput

Elohopeahöyrylamppu on purkauslamppu, jonka valontuotto perustuu suurpaineisessa elohopeahöyryssä tapahtuvaan kaasupurkaukseen. Purkauksessa syntyvä sähkömagneettinen säteily on pääosin näkyvää valoa ja osin ultraviolettisäteilyä. Valotehokkuuden ja väriominaisuuksien parantamiseksi osa UV-säteilystä muutetaan näkyväksi valoksi kuvun sisäpinnalla olevan loisteaineen avulla. [6, s. 230]

Elohopealamput tuottavat valkoista valoa, jonka värielämpötila on  $3\,400\text{--}4\,000\text{ K}$  ja  $R_a$ -indeksi  $40\text{--}60$ . Elohopealamput syttymisaika on noin  $2\text{--}6$  minuuttia. Lamppujen valotehokkuus vaihtelee välillä  $30\text{--}60\text{ lm/W}$  ja niiden polttoiäksi on arvioitu  $12\,000\text{--}24\,000$  tuntia. [7, s. 132] Sallittu käyttölämpötila näille lamputille on  $-50\text{--}+400\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]. Elohopealamput ovat EU:n poistettavien lamppujen listalla [1] ja niiden myynti kiellettiin 2015. Käytännössä elohopealamppuja ei siis enää asenneta, vaan ne on korvattu esimerkiksi monimetalli- tai suurpainenaatriumlampuilla, joilla on suurempi valotehokkuus ja monimetallilampuilla myös parempi värintoisto.

### 2.1.3 Loistelamput

Loistelamput ovat pienpaineisia elohopeahöyrylamppuja, joita käytetään laajalti teollisuuden matalammissa varasto-, käytävä- ja toimistotiloissa. Kaksikantaisissa putkimaisissa loistelampuissa purkausputki on täytetty elohopeakaasulla ja pienellä määrällä jalokaasua. Kaasuseoksen painetta säätämällä voidaan vaikuttaa lampun syttymisominaisuuksiin ja polttoikään. Pienipaineisessa purkauksessa suurin osa emittoidusta säteilystä on UV-alueella ja UV-säteily muutetaan näkyväksi valoksi purkausputken lasikuvun sisäpinnalla olevan loisteaineen avulla. [6, s. 204]

Tavalliset loistelamput on tarkoitettu käytettäväksi huoneenlämmössä, mutta sekä korkeille että matalille lämpötiloille on saatavilla loistelamppuja ( $-20\text{--}+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]). Kaksikantaloistelamppujen tehoalue on  $14\text{--}100\text{ W}$  ja valotehokkuus vaihtelee välillä  $25\text{--}100\text{ lm/W}$ . Polttoiäksi loistelampuille luvataan  $10\,000\text{--}16\,000$  tuntia. Loistelamppujen väriominaisuudet riippuvat käytetyistä loisteaineista ja ovat siten säädettävissä käyttötarkoituksen mukaan. Yleisesti valotehokkaiden lamppujen värintoistoindeksi ( $R_a\ 50\text{--}70$ ) on huonompi kuin heikompitehoisten lamppujen ( $R_a\ 85\text{--}95$ ). Värielämpötila vaihtelee  $2700\text{--}6500\text{ K}$  välillä. Syttymisen jälkeen lampun lämpeneminen ja elohopean höyrystyminen lopulliseen paineeseen kestää muutaman minuutin. Uudelleensyttyminen sen sijaan tapahtuu lähes heti. [6, s. 204–213], [7, s. 119–123], [8]

### 2.1.4 Monimetallilamput

Elohopealamput värintoisto-ominaisuuksia sekä valotehokkuutta voidaan parantaa lisäämällä purkausputkeen metallien halogeeniyhdisteitä ja pieni määrä jalokaasua. Saavutetut väriominaisuudet riippuvat käytetystä metallista. [8] Monimetallilamppuja käytetään yleisesti teollisuudessa ja suurissa kaupallisissa rakennuksissa sekä jonkin verran myös katuvalaistuksessa.

Monimetallilamppujen etuja ovat hyvä valotehokkuus (80–120 lm/W), värintoisto ( $R_a$  70–95) sekä valon väri (3 000–6 000 K). Monimetallilampuilla on myös suhteellisen pitkä elinikä, 6 000–30 000 tuntia ja näitä voidaan käyttää -50–+550 °C lämpötiloissa. Suurimpia haittoja näillä lampuilla ovat pitkä syttymisaika (3–5 min) sekä korkeahko hinta. [8, 9] Lisäksi uudelleensyttymisaika voi olla jopa 20 minuuttia. [3, s. 7.52]

### 2.1.5 Suurpainenatriumlamput

Suurpainenatriumlamput (SPN/HPS, engl. High Pressure Sodium) valontuotto perustuu korkeapaineisessa natriumkaasussa tapahtuvaan kaasupurkaukseen. Natriumin tuottama valo on oranssinkellertävää (värilämpötila noin 2 000 K) ja suurpainenatriumlamppujen värintoistoindeksi on huono (noin 20). Kuitenkin hyvän valotehokkuutensa (45–150 lm/W) ja edullisen hintansa vuoksi suurpainenatriumlamppuja käytetään paljon ulkovalaistuksessa sekä teollisuuden toissijaisissa kohteissa, joissa värintoisto ei ole tärkeä. [8]

Suurpainenatriumlampuilla on suhteellisen pitkä elinikä (12 000–16 000 tuntia) ja laaja sallittu käyttölämpötila (-50–+350 °C), mutta syttymisaika on 2–5 minuuttia ja uudelleensyttymisaika noin minuutin. Natriumin painetta nostamalla voidaan saavuttaa korkeampia värilämpötiloja ja parempaa värintoistoa, puhutaan niin sanotuista värikorjatuista suurpainenatriumlampuista. Paineen nostaminen laskee kuitenkin sekä valotehokkuutta (40–60 lm/W) että elinikää (6 000–10 000 tuntia) huomattavasti. [3, s. 7.53–58], [8, 9]

### 2.1.6 Ledit

Ledit eli loistediodit (engl. Light-Emitting Diode, LED) ovat puolijohdekomponentteja, jotka tuottavat valoa, kun tasavirtaa ajetaan niiden läpi. Ilmiötä kutsutaan elektroluminesenssiksi. Tavallisesti valaisimet koostuvat ledimoduuleista, jotka voivat sisältää kymmeniä ledejä. Säteilevän valon väri määräytyy puolijohdemateriaalin mukaan. Ledivalaisinten lämmönhallinta on erityisen tärkeää, sillä puolijohdeliitoksen kuumeneminen lyhentää polttoikää ja pienentää valotehokkuutta. Tämä vaikeuttaa ledivalaisinten kehittämistä korkean lämpötilan ympäristöihin. [8]

Ledien etuja erityisesti teollisuusvalaistuksessa ovat pitkä käyttöikä (20 000–100 000 tuntia), käytännössä välitön syttyminen, rajaton sytytyskertojen määrä ja suuri valotehokkuus (100–160 lm/W). Lisäksi ledejä on saatavilla värillisinä ja valkoisen eri sävyissä sekä laajalti eri tehoisina. Myös ledien säätömahdollisuudet ovat lähes rajattomat. Huonoja puolia sen sijaan ovat korkea hinta, jäähdytyksen tarve erityisesti suuritehoisilla laitteilla sekä häikäisyriski. [8]

Ledivalaisinten valotehokkuus kasvaa koko ajan ja Yhdysvaltain energiaministeriö (engl. Department of Energy) arvioi sen nousevan 200 lm/W:iin vuoteen 2020 mennessä. Toisaalta ledien hinnat ovat jatkuvassa laskussa. [5] Ledivalaisinten hintaan vaikuttaa kuitenkin valonlähteen lisäksi liitäntälaitte, kotelo, johdotus ja optiikka, joten ledien hinnanlasku ei näy aivan yhtä vahvasti valaisinmarkkinoilla.

Ledien väriominaisuuksista kertoo värilämpötilan ja värintoistoindeksin lisäksi värin tasaisuus. Värin tasaisuuden luokittelu perustuu ihmissilmän herkkyyteen tunnistaa värejä niin kutsutun MacAdam-ellipsien mallin mukaan. Ellipsien avulla määritetään, kuinka helposti ihminen erottaa kaksi väriä toisistaan. Mitä suurempi MacAdam-luku, asteikolla 1–10, sitä varmemmin ihminen huomaa värieron. Tällä luvulla valmistajat ilmaisevat kuinka suuri värilämpötilan vaihtelu ledivalaisimen, -nauhan tai -moduulin sisältämien ledisirujen välillä on. Sisävalaistukseen hyväksytään arvot 1–5 ja ulkovalaistukseen myös arvot 5–7. [10, 11]

Ledit ovat luontaisesti himmennettävissä (analogisesti tai digitaalisesti) ja välittömästi ohjattavissa, joten ne voidaan suoraan yhdistää anturi- ja ohjausjärjestelmiin. Käyttämällä järjestelmissä läsnäolotunnistusta, vakiovalosäätöä ja paikallista valotason säätöä voidaan saavuttaa suuria energiansäästöjä. [5] Ohjausjärjestelmiä esitellään tarkemmin luvussa 2.2.

Ledien polttoikää ei voida määritellä perinteisin keinoin, sillä täydellisen hajoamisen sijaan polttoikä määräytyy valovirran alenemasta ajan myötä. Toisaalta ledien, ledimoduulien ja ledivalaisinten polttoiät voivat vaihdella paljonkin, mutta tässä työssä olemme kiinnostuneita valaisinten kokonaispolttoikästä sisältäen liitäntälaitteen ja ledimoduulin.

Yleisesti ledimoduuleille määritellään L-, B-, ja C-arvot. L-arvo ( $L_{70}$ ,  $L_{80}$  tai  $L_{90}$ ) ilmoitetaan yhdessä laskennallisen polttoiän kanssa ja kertoo, kuinka monta prosenttia valotehokkuus on alkuperäisestä kyseisen ajan jälkeen. Esimerkiksi  $L_{70}$  50 000 h tarkoittaa, että 50 000 tunnin jälkeen moduulin valotehokkuus on 70 % alkuperäisestä. B-arvo puolestaan määrittää L-arvon variaation. Yleisin arvo on  $B_{50}$ , jolloin ilmoitettu L-arvo saavutetaan 50 %:lla moduuleista. Jos B-arvo on  $B_{10}$ , 90 % moduuleista saavuttaa luvutun L-arvon. C-arvo määrittää täydellisen vikaantumisen prosenttiosuuden ledimoduulin polttoiän aikana, eli mahdollisuuden moduulin sammumiseen. Useimmiten moduulien C-arvo on yhden prosentin luokkaa ja se voidaan jättää huomioimatta valaisimen polttoiän määrittämisessä. Jotkut valmistajat käyttävät B- ja C-arvojen sijaan F-arvoa, joka on edellisten summa ( $F = B + C$ ). [12]

Liitäntälaitteen käyttöiän määrittävät käytetyt komponentit, rakenne ja käyttölämpötila. Usein liitäntälaitteen käyttöikä voi olla jopa puolet lyhyempi kuin ledimoduulin ja se joudutaan vaihtamaan aiemmin. [11]

### 2.1.7 Vertailu

Taulukossa 1 on vertailtu edellä esiteltyjen valonlähteiden ominaisuuksia. Taulukosta nähdään, että ledit ovat selkeästi valotehokkaimpia ja monipuolisimpia valaisimia. Niillä on pisin polttoikä, ne syttyvät heti ja niitä voidaan himmentää rajatta. Hinta sen sijaan on korkeampi kuin muilla tutkituilla valonlähteillä. Monimetallilamput

ovat muuten ledien kanssa hyvin tasavertaisia, mutta suurimmat erot näkyvät tehonkulutuksessa, syttymisajoissa ja polttoikässä. Suurpainenatriumlamput yltävät myös suuriin valotehokkuuksiin, mutta värilämpötilan ja värintoiston kustannuksella, eivätkä siten täytä standardissa [4] määrättyjä parametreja teollisuusvalaistukselle kaikissa tiloissa. Elohopealamput ovat selkeästi heikoimpia näistä vaihtoehtoista ja EU onkin kieltänyt niiden käytön vuodesta 2015 alkaen [1].

Purkauslamput ovat ympärisäteileviä ja siten vaativat erilaisia heijastimia valon suuntaamiseen. Näillä tekniikoilla toteutetut valaisimet tuottavat siis paljon hajavaloa ja tehohäviöt ovat melko suuret. Ledien säteilykulma sen sijaan on useimmiten  $120^\circ$ , joten heijastimia ei tarvita. Ledien valoa voidaan myös suunnata erilaisilla linseillä sopivan valonjaon saavuttamiseksi.

Taulukko 1: Teollisuusvalaistuksen tavallisimpien valonlähteiden vertailu [3, 5, 6, 7, 8, 13]. Liitäntälaitteiden vaikutusta ei ole arvoissa huomioitu.

	Halogeeni-lamppu	Elohopea-lamppu	Loistelamppu	Monimetalli-lamppu	HPS-lamppu	Värikorjattu HPS-lamppu	LED-valaisimet
Tehoalue [W]	100–2 000	50–2 000	14–100	20–2 000	35–1 000	50–400	5–400
Valotehokkuus [ $\frac{lm}{W}$ ]	12–35	30–60	25–100	80–120	45–150	40–60	100–160
Väriämpötila [K]	2 800–3 000	3 400–4 000	2 700–6 500	3 000–6 000	1 900–2 200	2 200–2 700	2 700–7 000
R <sub>a</sub> -indeksi [-]	100	40–60	50–95	70–95	20–60	60–85	60–95
Polttoikä [h]	2 000–4 000	12 000–24 000	10 000–16 000	6 000–30 000	12 000–16 000	6 000–10 000	20 000–100 000
Syttymisaika [min]	0	2–6	2–5	3–5	2–5	2–6	0
Uudelleensyttymisaika [min]	0	2–5	0	4–20	1–5	2–6	0
Tehonsäätö [%]	0–100	50–100	5–100	50–100	35–100	60–100	0–100
Ympäristön lämpötila T <sub>a</sub> [°C]	max +450	-50–+400	-20–+80	-50–+550	-50–+350	-50–+350	-40–+90
Yksikköhinta lamppu/moduuli[-]	edullinen	edullinen	edullinen	korkea	kohtalainen	korkea	kohtalainen
Yksikköhinta valaisin[-]	edullinen	kohtalainen	edullinen	kohtalainen	kohtalainen	kohtalainen	korkea

## 2.2 Valaistuksen ohjaus ja säätö

Huomattava osa valaistuksen energiansäästöistä voidaan saavuttaa tarkoituksenmukaisella ohjauksella. Aiemmin valaistuksen ohjaus käsitti lähinnä päälle/pois-kytkennän ja himmennuksen suoraan kytkimestä, mutta nykyään saatavilla on monenlaisia älykkäitä valaistuksen ohjausratkaisuja, joissa voidaan hyödyntää esimerkiksi liiketunnistusta, vakiovalosäätöä ja päivänvalo-ohjausta. Tässä luvussa esitellään teollisuuskäyttöön sopivimmat ohjaustavat, -periaatteet ja -järjestelmät.

### 2.2.1 Vakiovalosäätö

Vakiovalosäädön tarkoituksena on pitää valaisinten tai lamppujen valovirta vakiona koko eliniän ajan. Ledien vanhenemisen aiheuttamaa valovirran alenemaa voidaan kompensoida vakiovalosäädöllä eli syöttämällä valonlähdettä aluksi pienemmällä teholla ja kasvattamalla sitä valovirran alentuessa. Usein valaisimen eliniäksi on määritetty aika, jona valovirta on laskenut 30 % ( $L_{70}$ ), mutta vakiovalosäädön avulla valaisinta voidaan käyttää samalla valovirralla pidempään. Vakiovalosäätö ei kuitenkaan pidennä liitälaitteen elinikää. [14]

### 2.2.2 Läsnaolo- ja päivänvalo-ohjaus

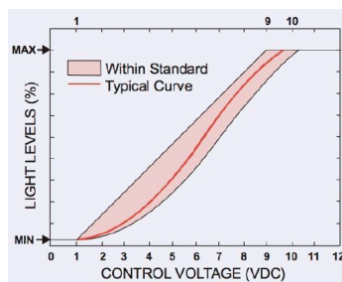
Tärkeimmät energiansäästöä tuovat ohjausratkaisut ovat läsnäolo- ja päivänvalo-ohjaus, sillä tyhjen tilojen turhasta valaisusta on helppo säästää. Läsnaolo-ohjauksella tila valaistetaan vain silloin, kun tilassa on ihmisiä. Läsnaolo-ohjauksessa valot syttyvät, kun läsnäoloanturi havaitsee liikettä ja sammuvat asetetun ajan kuluttua viimeisestä havainnosta. Läsnaolotunnistimia on sekä valaisimeen integroituina että irrallisina seinälle tai kattoon asennettavina. Läsnaolotunnistimet perustuvat infrapunasäteilyyn, ääneen, ultraäänisignaaliin tai mikroaaltoihin ja niiden kanssa käytetään yleensä myös ajastimia. [15] Teollisuudessa läsnäolo-ohjausta voidaan hyödyntää erityisesti varastotiloissa, joiden käyttöaste on pieni.

Toinen energiansäästöratkaisu on päivänvalo-ohjaus, jonka myötä tilan valaistus voidaan tuottaa osittain tai jopa kokonaan päivänvalon avulla. Tässä ohjaustavassa tilan valaistustaso pyritään pitämään vakiona säätämällä sähkövalaistusta valaisimeen tai tilaan asennetun valoisuusanturin avulla. Päivänvalo-ohjausta käytetään usein läsnäolo-ohjauksen kanssa yhdistetysti, jolloin molempien hyödyt saadaan käyttöön. Teollisuudessa päivänvalon saatavuus on usein huonompi kuin esimerkiksi toimistotiloissa, joissa on yleensä paljon ikkunoita, ja siksi päivänvalo-ohjausta käytetään teollisuudessa harvemmin.

### 2.2.3 Analoginen 1–10 V -ohjaus

Analoginen ohjaus on yksinkertaisin keino ohjata himmentimiä ja muita jännitettä säätäviä ohjauslaitteita etänä. Yleisin käytetty ohjaustapa on kansainvälisessä liitälaitestandardissa kuvattu ohjausprotokolla, jossa liitälaitetta ohjataan 1–10 voltin tasajännitteellä. Liitälaitte mittaa ohjauspiirin jännitettä ja muodostaa tarvittavan ohjausvirran valaisimelle. Valotaso määräytyy ohjaussignaalista kuvan 1

mukaisesti. 1–10 V -ohjaus vaatii vaihe-, nolla- ja suojamaajohtimien lisäksi kaksi ohjausjohdinta ja on tarkoitettu lähinnä loistelampuille. [15]



Kuva 1: Valotaso ohjausjännitteen funktiona 1–10 V järjestelmässä. [7, s. 282]

Minimi- ja maksimivalotasot riippuvat valaisintyyppistä ja liitälaitteesta. Esimerkiksi suurpainenatriumlampuille minimitaso olisi noin 50 %. Kuten kuvasta 1 nähdään, ei valotaso laske nollaan prosenttiin ohjausjännitteen laskiessa nollaan. Valaisimia ei siis voida sammuttaa ohjausjännitteen avulla, vaan verkkovirta on katkaistava esimerkiksi releellä tai kontaktorilla. [7] Teollisuuden uusissa ratkaisuissa ei enää ole järkevää käyttää tätä ohjaustapaa, sillä samalla johdotuksella pystytään käyttämään älykkämpiä ohjaustapoja, kuten DALIa (ks. luku 2.2.5).

#### 2.2.4 Suora painikeohjaus

Suoralla painikeohjauksella saavutetaan käytännössä samat toiminnallisuudet kuin 1–10 V -ohjauksessa. Siinä liitälaitte kytketään päälle ja pois sekä himmennetään painonapilla tai vetokytkimellä. Ohjaus on usein yhdistetty väyläjärjestelmällä, kuten DALI (ks. luku 2.2.5), toimimaan liitälaitteeseen.

Etuna tässä järjestelmässä on, ettei erillisiä ohjaimia tarvita. Toimintaperiaate on myös hyvin yksinkertainen: valaisimet sytytetään ja sammutetaan kytkimen lyhyellä painalluksella ja valonvoimakkuutta säädetään pitämällä ylös- tai alaspainiketta alas painettuna. Lisäksi ohjauspisteitä voi olla useita rinnakkain. [15]

#### 2.2.5 DALI

DALI eli digitaalinen osoitteellinen valaistuksen ohjausväylä (engl. Digital Addressable Lighting Interface) on valaistuksen ohjauksen protokolla, joka takaa eri valmistajien elektronisten liitälaitteiden yhteensopivuuden. DALI-järjestelmässä elektroniset liitälaitteet, käyttöpaneelit, anturit ja ohjelmointilaitteet liitetään samaan yksinkertaisella johtoparilla muodostettuun väylään. Väylässä digitaalinen noin 16 voltin signaali siirtyy kaikkien järjestelmän laitteiden välillä. Digitaaliväylän johdinten lisäksi valaisimelle tuodaan normaalisti vaihe-, nolla- ja suojamaajohtimet. Lisäksi ohjausväylä vaatii teholahteen, joka tarjoaa väylälle enintään 250 mA:n ohjausvirran.

Yhteen DALI-väylään voidaan liittää 64 ohjattavaa laitetta ja niistä voidaan muodostaa yhteensä 16 ohjausryhmää. Monissa järjestelmissä DALI-väyliä voidaan

laittaa rinnakkain samaan järjestelmään ja näin ohjata myös paljon suurempia kokonaisuuksia. [16] DALIa käytetään paljon toimisto- ja liiketiloissa, joissa valaistuksen käyttö on hetkellistä ja vaihtuvaa, toisin kuin teollisuudessa [14].

### 2.2.6 KNX

KNX on kansainvälinen avoin standardoitu talotekniikkaväylä, jolla voidaan valaistuksen lisäksi ohjata myös esimerkiksi lämmitystä ja turvatekniikkaa. KNX-väylässä laitteet kommunikoivat keskenään ilman keskitettyä tietokonetta. Tiedonsiirto väylässä kulkee kierretyllä parikaapeliverkolla, valokuitukaapelilla, langattomasti radio- taajuuksilla tai sähköverkon kaapeloinnin kautta. Järjestelmän toimintoja ohjataan kytkimillä, ohjauspaneelilla tai langattomasti esimerkiksi matkapuhelimen välityksellä.

Markkinoilla on vasta vähän KNX:ää suoraan tukevia valaistuksen liitäntälaitteita, joten usein käytetään erillisiä muuntimia, joilla KNX voidaan yhdistää esimerkiksi DALI-väylään ja siten ohjata useimpia valaisimia. [17]

### 2.2.7 C2 SmartLight – langaton ohjaus

Langaton ohjaus on helppo ottaa käyttöön saneerauskohteisiin, sillä se ei vaadi uutta ohjauskaapelointia. C2 SmartLight Oy on suomalainen yritys, joka tarjoaa älykästä ulkovalaistuksen ohjausta. C2-järjestelmällä voidaan ohjata langattomasti yksittäisiä valaisimia keskusyksikön kautta. Järjestelmään voidaan liittää läsnäolotunnistimia ja hämäräkytkimiä, joiden avulla määritetään optimaalinen valaistus.

Valaisinkohtaiset ohjaimet asennetaan valaisimeen tai sen lähelle ja kytketään valaisimen DALI- tai 1–10 V -ohjauspiiriin himmennystä varten. Keskusyksikkö ja ohjain on yhdistetty langattoman ZigBee-verkon kautta, jolloin ohjauskaapelointia ei tarvita. Liiketunnistimien ohjausalueet ja ryhmäkohtaiset himmennysprofiilit voidaan ohjelmoida langattomasti kannettavalla tietokoneella. [18]

### 2.2.8 Philips GreenWarehouse – langaton ohjaus

Toinen langatonta ohjausta teollisuusvalaistukseen tarjoava yritys on Philips. Heidän GreenWarehouse-ohjausjärjestelmänsä on tarkoitettu erityisesti varastotiloihin, joissa ei ole paljon toimintaa. Asennuskorkeus on rajoitettu 12 metriin ja järjestelmä vaatii Philipsin omat valaisimet. Järjestelmän asentaminen ei vaadi uusia johdotuksia ja sen määrittäminen vyöhykkeiksi on mahdollista kauko-ohjaimen avulla myös uudelleen tarpeiden muuttuessa. [19]



### 3 Elinkaarikustannukset ja kannattavuus

Valaistusratkaisun kannattavuutta voidaan arvioida monesta eri lähtökohdasta. Rakennuttajaa kiinnostavat hankinta- ja asennuskustannukset, kun taas rakennuksen käyttäjää kiinnostavat käyttöajan kustannukset, kuten energiankulutus ja huoltokustannukset. Tästä syystä valaistusratkaisun kannattavuutta tutkittaessa käytetään elinkaarikustannusarviota (engl. life cycle cost (LCC) analysis), joka ottaa huomioon kaikki valaistusratkaisun kustannukset sen koko elinkaaren ajalta, antaen päätöksentekijöille selkeän kuvan sijoituksen taloudellisista kokonaishyödyistä. Valaistuksen hyötyjä turvallisuuden, työn tuottavuuden, viihtyvyyden ja terveyden osalta on rahassa hankala mitata, joten menetelmä ei huomioi näitä. [8, 20]

Tässä luvussa esitellään työn tutkimusmenetelmät, joiden avulla voidaan suorittaa tarvittavat elinkaarikustannus- ja kannattavuuslaskelmat.

#### 3.1 Elinkaarikustannusarvio

Elinkaarikustannusarviossa huomioidaan kiinteät ja muuttuvat kustannukset koko valaisimen käyttöajalta. Kiinteät kustannukset kattavat valaisimen ja ohjauksen ostohinnan lisäksi suunnittelu-, johdotus- ja asennuskulut. Muuttuviin kustannuksiin taas kuuluvat energia, yksittäisten valonlähteiden vaihdot, puhdistus, muiden osien (kuori, linssit, liitäntälaitteet) uusinta sekä muut mahdolliset käytön ajan kustannukset. [8]

Valaistuksen vuosittaista energiankulutusta voidaan arvioida valaisinten tehon (mukaan lukien liitäntälaitte), määrän ja käyttöajan avulla, kuten yhtälö 1 [8] osoittaa.

$$W = \sum P t f \quad (1)$$

missä

$W$	energiankulutus (kWh)
$P$	liitäntäteho (kW)
$t$	vuosittainen käyttöaika (h)
$f$	säätökerroin, joka ottaa huomioon himmennuksen ja poiskytkentäajanjaksot

Sama tieto energiankulutuksesta saadaan myös DIALux-ohjelmistosta.

Elinkaarikustannuksia voidaan laskea kahdella tavalla: annuiteetti- ja nykyarvomenetelmällä. Annuiteettimenetelmässä kustannukset jaetaan tasaisiin osiin joka vuodelle. Annuiteettitekijä lasketaan yhtälöllä 2. [20]

$$C_a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot I_0 + C_o \quad (2)$$

missä

$C_a$	vuosikustannus (€)
$i$	korkoprosentti ( $i = p/100$ , missä $p$ on korkoprosentti prosentteina)
$n$	valaisimen käyttöikä vuosina
$I_0$	investointikustannus (valaisimen, suunnittelun ja asennuksen hinta) (€)
$C_o$	vuosittaiset käyttökustannukset (€)

Nykyarvomenetelmässä tulevaisuuden kustannukset muutetaan diskonttaamalla investointiajankohdan rahamääräksi eli nykyarvoksi yhtälöllä 3. [20]

$$NA = I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n} + \frac{R}{(1+i)^N} \quad (3)$$

missä

NA	nykyarvo (€)
$I_0$	investointikustannus (valaisimen, suunnittelun ja asennuksen hinta) (€)
$C_n$	vuoden käyttökustannukset (€)
$i$	korkoprosentti ( $i = p/100$ , missä $p$ on korkoprosentti prosentteina)
$n$	aika (vuosi)
$N$	vuosien määrä
$R$	jäännösarvo (€)

Jos käyttökustannukset pysyvät vakiona ( $C$ ) koko laskenta-ajan, voidaan yhtälö 3 yksinkertaistaa muotoon

$$NA = I_0 + \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \cdot C + \frac{R}{(1+i)^N} \quad (4)$$

Nykyarvomenetelmä on näistä menetelmistä yleisemmin käytetty ja siksi myös tässä työssä käytetään tätä menetelmää.

## 3.2 Takaisinmaksuaika

Valaistusratkaisun kannattavuutta voidaan tutkia takaisinmaksuajan avulla. Laskelmia varten vertaillaan erilaisten valaistusratkaisujen kustannuksia. Huomioon otetaan energia-, hankinta-, asennus- ja huoltokustannukset. Näitä vertaamalla voidaan laskea vuosittaiset uusilla ratkaisuilla saatavat säästöt, joista voidaan laskea uuden valaistuksen takaisinmaksuaika rahan aika-arvon huomioon ottavalla yhtälöllä 5. [20]

$$\text{takaisinmaksuaika} = \frac{-\ln(1 - \frac{i \cdot C_i}{C_{op,o} - C_{op,n}})}{\ln(1+i)} \quad (5)$$

missä

$C_i$	investointikustannukset (€)
$C_{op,o}$	vanhan asennuksen käyttökustannukset (€)
$C_{op,n}$	uuden asennuksen käyttökustannukset (€)
$i$	korkoprosentti ( $i = p/100$ , missä $p$ on korkoprosentti prosentteina)

Näiden yhtälöiden lisäksi on saatavilla valmiita laskentaohjelmia valaistuksen elinkaarikustannusten ja takaisinmaksuajan arvioimiseen. Joillain valaisinvalmistajilla on yksinkertaisia laskureita sivuillaan (esimerkiksi I-Valo, Glamox). Lisäksi Motiva on yhteistyössä valaistusalan yritysten ja asiantuntijoiden kanssa kehittänyt VALTTI-laskurin, joka on kattava Excel-laskupohja erilaisten valaistusratkaisujen elinkaarikustannusten arviointiin. Laskuri perustuu nykyarvomenetelmään. [21]

## 4 Case-tutkimuksen mittaukset

Tässä ja seuraavassa osiossa tutkitaan esimerkinomaisesti Sappi Ltd:n Kirkniemen paperitehtaan valaistusta. Tutkimuksen kohteena on kaksi erilaista tilaa: paperisali, jossa valaistus täytyy pitää jatkuvasti tasaisena ja varastotila, jossa valoa tarvitaan vain satunnaisesti. Molemmissa tiloissa on myös luonnonvaloa, mutta sen osuus on pieni.

Sisävalaistusstandardissa SFS-EN 12464-1 [4] erilaisten tilojen valaistukselle määritetään minimivaatimukset valaistusvoimakkuudelle, valaistuksen tasaisuudelle sekä värintoistoindeksille ja maksimiarvon UGR-häikäisyindeksille. Nämä vaatimukset on esitetty taulukossa 2 ja ne tulee ottaa huomioon kohteen valaistusta suunniteltaessa.

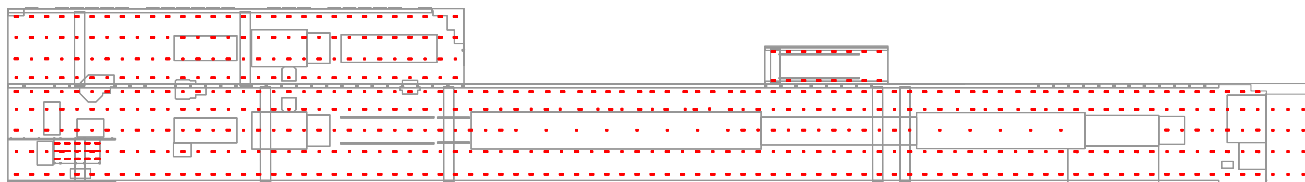
Taulukko 2: Standardissa SFS-EN 12464-1 määritellyt vaatimukset paperiteollisuuden ja varastotilojen valaistukselle. [4]

Tila, tehtävä tai toiminta	$\bar{E}_m$ (lx)	$U_d$	$R_a$	UGR
Paperin valmistus ja tuotanto	300	0,40	80	25
Varastotilat	100	0,40	60	25
Varastohyllyn etureuna (pystysuora valaistusvoimakkuus)	200	0,40	60	-

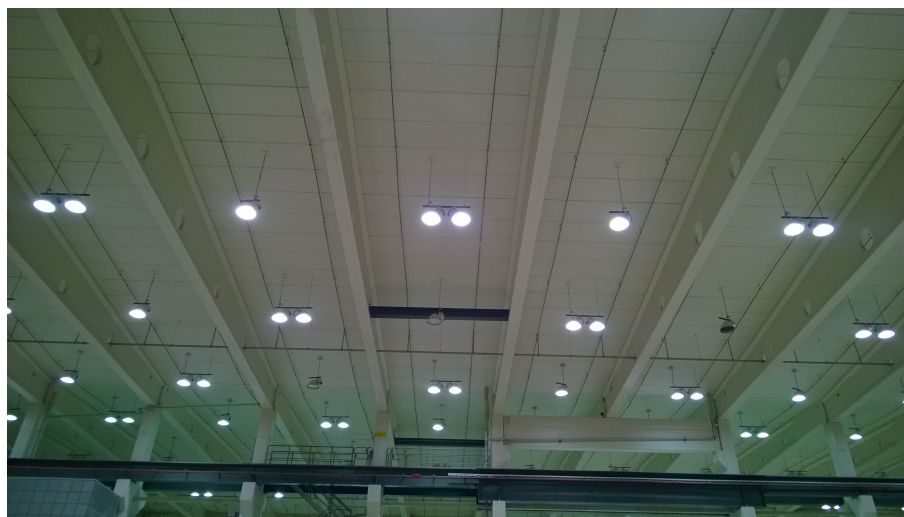
Luvussa 4.1 selvitetään tutkimuskohteen valaistuksen nykytila ja tutkitaan sen ominaisuuksia. Seuraavaksi luvussa 4.2 esitetään tehdyt mittaukset ja luvussa 4.3 DIALux-ohjelmistolla tehty mallinnus sekä sen simulointitulokset. Lopuksi luvussa 4.4 lasketaan sähkönkulutus nykyiselle asennukselle.

### 4.1 Valaistuksen nykytila

Kirkniemen paperitehtaan paperisali PK3 on rakennettu vuonna 1996. Paperisali on 516 m pitkä, enimmillään 70 m ja kapeimmillaan 40 m leveä ja katto on 18 m korkeudessa. Salin pinta-ala on noin 26 760 m<sup>2</sup>. Paperisalin valaistus on toteutettu 16,5 metrin korkeuteen asennetuilla I-Valon Regular 6242 400 W monimetallisyvästeilijöillä (906 kpl). Valaisinjakso on leveyssuunnassa 5–9 metriä ja pituussuunnassa 6 metriä. Halutun valaistusvoimakkuuden saamiseksi osaan pisteistä on asennettu valaisimen pariversiot, joissa on yhdessä kaksi valaisinta. Paperikoneen päällä kohdissa, joissa valon tarve on pienempi, on valaisimet asennettu 12 metrin välein. Lisäksi hylsyvaraston alapuolelle 3 m korkeuteen on asennettu 15 I-Valon 6441 teollisuusloistevalaisinta kolmeen viiden valaisimen riviin. Valaisinten paikat on esitetty paperisalin PK3 pohjapiirroksessa kuvassa 2 sekä tarkemmin liitteessä A. Osa valaisimista on huollettu 4 vuotta sitten (2012) ja osa jopa 12 vuotta sitten (2004) ja selkeää värimuutosta on havaittavissa (kuva 3). Yksittäisiä valaisimia ei kohteessa vaihdeta, vaan huolto tehdään aina suurempi alue kerrallaan kustannussyistä. [22]



Kuva 2: Paperisalin PK3 pohjapiirros ja valaisinten (punaisella) paikat. Tarkempi kuva liitteessä A.



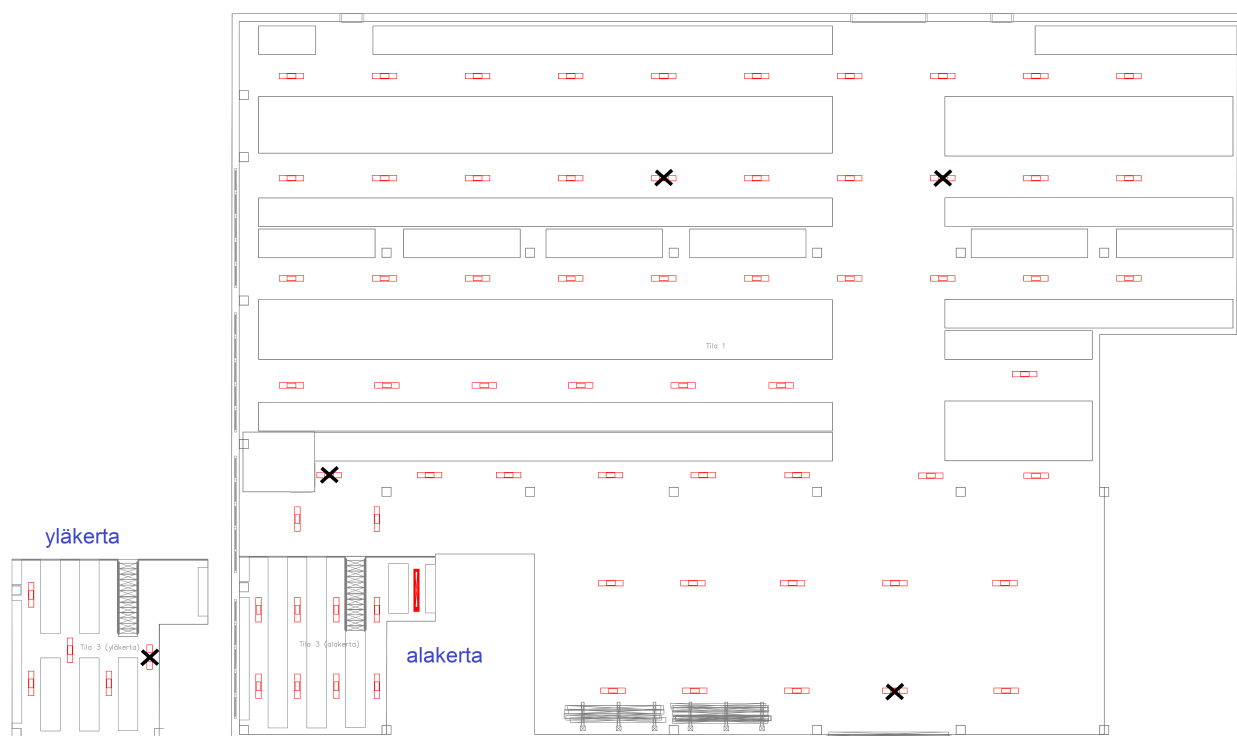
Kuva 3: Paperisalin PK3 valaisimissa on havaittavissa värimuutosta.

Moottorivarasto on rakennettu 1996 ja sen valaistus on uusittu kokonaan 2009. Varaston suurempi tila on 23,8–41,2 m leveä, 29,6 m pitkä ja 5,6 m korkea. Kaksikerroksinen tila on 7,5 m pitkä ja 6,1–8,1 m leveä. Alakerran korkeus on 2,5 m ja yläkerran 2,9 m. Isomman tilan pinta-ala on noin 1 057 m<sup>2</sup> ja kaksikerroksisen noin 51 m<sup>2</sup> kerrosta kohden. Nykyinen valaistus on enimmäkseen toteutettu 5,1–5,4 m korkeuteen käytävien suuntaisesti noin 4 metrin välein kiskoon asennetuilla I-Valon 250 W monimetallilampuilla varustetuilla laajasäteilijöillä 6231 (57 kpl). Kaksikerroksisessa osassa on samat valaisimet (13 kpl) asennettu 2,5 m korkeuteen. Yhdellä matalista käytävistä on I-Valon 6441 loistelamppuvalaisin, jossa kaksi 58 W T8-loistelamppua. Moottorivaraston valaisinten paikat on merkitty kuvan 4 pohjapiirrokseen.

## 4.2 Mittaukset ja laskelmat

Tässä osiossa esitetään tilojen nykyisen valaistuksen kartoittamiseen käytetyt mittausmenetelmät ja mittausten tulokset.

Mittaukset tiloissa tehtiin 4.4.2016 paperisalissa klo 16:00–18:30 ja 21:00–00:15 sekä varastotilassa klo 19:00–20:30 ja 00:30–1:30 (päivänvalo ja pimeä). Päivä oli aurinkoinen, hämärä alkoi klo 19:33 ja aurinko laski klo 20:16. Ensin varmistettiin



Kuva 4: Moottorivaraston pohjapiirros ja valaisinten paikat. Rikkinäiset valaisimet on merkitty ruksilla. Suurempi kuva löytyy liitteestä A.

lämpömittarilla, että valaisimet olivat normaalissa käyttölämpötilassa ja sähkökaapin jännitemittarista tarkistettiin käyttöjännitteen olevan normaali. Valaisimet ovat jatkuvasti päällä, eli ne olivat ehtineet lämmitä stabiiliin tilaan sytytyksen jälkeen.

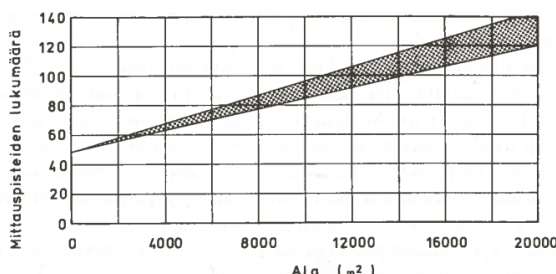
Ennen mittauksia laskettiin sammuneiden lamppujen määrä ja paikat, sekä selvitettiin edellisestä huollosta kulunut aika. Varmistettiin myös, että huonepintojen puhtaus vastaa normaaleja käyttöolosuhteita.

#### 4.2.1 Valaistusvoimakkuus

Valaistusvoimakkuusmittaukset suoritettiin Konica Minolta CL-500A -laitteella, jossa on yhdessä valaistusvoimakkuusmittari sekä spektrofotometri. Mittalaite kiinnitettiin kamerasalustaan oikean korkeuden ja vaakatason asennon varmistamiseksi. Varmistettiin myös, ettei mittaja varjostanut anturia.

Paperisalin mittauspisteiden määrittämiseksi käytetään Ahposen [23, s. 129] määritelmää. Kirjassa suositellaan teollisuusalueilla käytettäväksi neliön tai suorakaiteen muotoisia mitta-alueita, joiden sivujen pituudet ovat 5–10 m alueen koon mukaan. Kuvasta 5 nähdään suurten suorakaiteen muotoisten alueiden tarvittavien mittauspisteiden vähimmäislukumäärä. Mittauspisteiden määrittämisessä tulisi myös ottaa huomioon valaisinten paikat sekä kiinteät kalusteet. Mittauspisteiden ei tulisi olla symmetrisesti valaisimiin nähden. Näiden pohjalta paperisalin mittauspisteruutujen kooksi valittiin 7 m × 10 m ja mitta-alueiden määräksi saadaan 411. Suunnitellut

sekä toteutuneet mittauspisteet on esitetty liitteessä B ja mittausten tulokset liitteessä C. Pohjapiirroksen on merkitty myös nostureiden asemat mittaushetkellä. Tilassa on paljon koneita, putkia ja liikkuvia esineitä, jotka estivät mittaukset osassa pisteitä. Vain ikkunoiden läheisyydessä olevissa pisteissä mitattiin sekä päivällä että yöllä, sillä päivänvalo vaikuttaa vain hyvin pienellä alueella. Lopulta mittaukset tehtiin päivällä 118 ja yöllä 67 pisteessä.



Kuva 5: Suorakaiteen muotoisten alueiden mittauspisteiden lukumäärän riippuvuus alueen koosta. [23, s. 130]

Moottorivaraston mittauspisteiden valintaan vaikuttivat vahvasti tilan hyllyköiden sijainti. Mittausalueiden kooksi isommassa tilassa valittiin  $2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  ja lukumääräksi 85 sekä pienemmässä tilassa  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  ja 32. Valaisinten paikat ja lukumäärä olivat edellisessä huollossa muuttuneet pohjapiirroksen tilanteesta, joten suunnitelluista pisteistä mitattiin vain osassa. Mittauksia tehdessä todettiin, että isomman tilan hyllyjen välit olivat valaistuksen suhteen lähes identtiset, joten näistä hyllyväleistä mitattiin vain kaksi, toinen päivällä ja toinen yöllä. Pienemmässä tilassa mittaukset tehtiin vain 19 pisteessä, osa päivällä ja osa yöllä. Myös siellä valaistus oli melko tasaista, joten hyllyväleistä mitattiin vain joka toinen. Mittaukset tehtiin isommassa tilassa päivällä 26 ja yöllä 17 eri pisteessä. Mittauspisteet ja mittausten tulokset on esitetty liitteessä C.

Tiloissa oli paljon pisteitä, joita ei koneiden tai muiden esteiden vuoksi päästy mittaamaan, joten näille pisteille arvioitiin valaistusvoimakkuus lähimpien mitattujen arvojen keskiarvoina. Suoran auringonpaisteen mittaustulokset jätettiin kuitenkin arviosta pois. Tästä johtuvat yhtäläisyydet ja eriävyydet taulukon 3 arvoissa. Mittatuloksista ja arvioista laskettiin myös valaistusvoimakkuuden tasaisuus  $U_d$  ( $U_d \leq 1$ ) eli pienimmän arvon ja keskiarvon ( $\bar{E}_m$ ) suhde. Tulokset on esitetty taulukossa 3 josta nähdään, että valaistuksen tasaisuus jää reilusti alle suositellun arvon.

Paperisaliissa nosturin ollessa mittauspisteen yläpuolella tai aivan lähellä, huomattiin valaistusvoimakkuustasoissa selkeä ero. Näissä 11 pisteessä mitattu keskimääräinen valaistusvoimakkuus päivällä jäi vain 300 luksiin, kun muualla se oli 535 luksia. Silmämääräisesti nosturi langettaa kuitenkin selkeän varjon. Ikkunan ääressä auringonpaisteessa valaistusvoimakkuus oli jopa 11 000 luksia.

Taulukko 3: Mitattujen ja mittausten pohjalta arvioitujen valaistusvoimakkuuksien minimi- ja maksimi-arvot sekä niistä laskettu tasaisuus eri tiloissa.

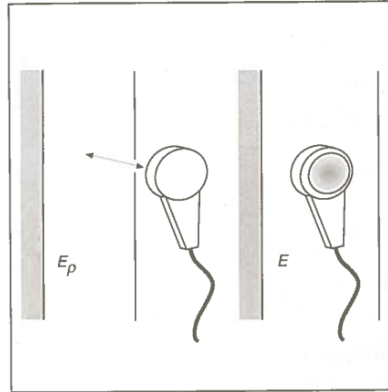
(a) Paperisali PK3				(b) Moottorivarasto			
	Paperisali PK3		arvio päivällä		Moottorivarasto		arvio
	mitatut päivä	yö			mitatut iso tila	pieni tila	
$\bar{E}_{max}$ [lx]	11 310	424,2	644,3	$\bar{E}_{max}$ [lx]	463,1	2 133	463,1
$\bar{E}_{min}$ [lx]	119,6	59,4	59,4	$\bar{E}_{min}$ [lx]	61,9	87,3	61,9
$\bar{E}_m$ [lx]	513	303,7	308,3	$\bar{E}_m$ [lx]	308,3	566,1	306,3
$U_d$	0,23	0,20	0,19	$U_d$	0,20	0,15	0,20

#### 4.2.2 Heijastussuhde

Pinnan heijastussuhde  $\rho$  ilmoittaa prosentteina, kuinka suuri osa pinnalle tulevasta valosta heijastuu takaisin. Heijastussuhde mitattiin luvussa 4.2.1 esitellyn valaistusvoimakkuusmittarin avulla. Kuvassa 6 on esitetty menetelmän periaatepiirros, jonka mukaisesti valaistusvoimakkuus mitataan ensin valokenno pintaan päin suunnattuna ( $E_\rho$ ) ja sitten pinnasta pois päin ( $E$ ). Näistä mittaustuloksista voidaan laskea heijastussuhde yhtälöllä 6.

$$\rho = \frac{E_\rho}{E} \quad (6)$$

Etäisyydeksi seinästä valitaan se piste, jossa valaistusvoimakkuus ei enää muutu eli jossa mittari ei enää varjosta mittausta.



Kuva 6: Heijastussuhteen mittaaminen valaistusvoimakkuusmittarilla. [23, s. 143]

Mittaukset tehtiin paperisalissa seinällä noin 1,3 m korkeudella neljässä pisteessä ja lattialla neljässä pisteessä sekä moottorivarastossa seinällä kolmessa pisteessä ja lattialla kolmessa pisteessä. Katon heijastussuhdetta ei pystytty mittaamaan, mutta se on samaa materiaalia kuin seinät, joten käytettiin samoja heijastussuhteita.



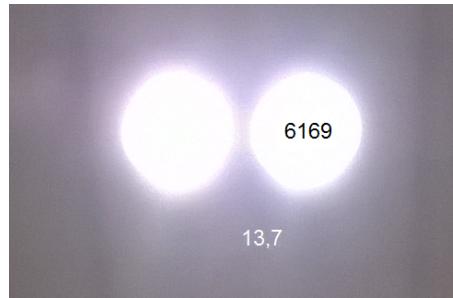
Pintojen materiaalit ja saatujen tulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 4 ja tarkat mittaustulokset liitteessä D. Paperisalissa oli kahta erilaista lattiaa ja molempien arvot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4: Mitattujen valaistusvoimakkuuksien keskiarvot  $E_{\rho,avg}$  ja  $E_{avg}$  sekä niistä laskettu heijastussuhde eri pinnoilla eri tiloissa.

tila	paperisali			moottorivarasto	
pinta	seinä	lattia	lattia	seinä	lattia
pinnoite	maalattu betoni	epoksimaali	laatta	betoni	
$E_{\rho,avg}$ [lx]	83,6	103,5	72,4	82,5	47,2
$E_{avg}$ [lx]	133,1	227,4	273,6	156,8	327,6
$\rho$	0,63	0,46	0,26	0,53	0,14

#### 4.2.3 Luminanssi ja häikäisy

Luminanssimittaukset tehtiin Konica Minoltan LS100-laitteella osittain päivänvalossa ja osittain pimeällä. Paikan päällä arvioitiin häikäisyä silmämääräisesti ja paperisalissa häiritseväksi koettiin ainoastaan ikkunoiden kirkkaus aamu- tai iltauringon paistaessa suoraan sisään. Valaisimet sijaitsevat niin korkealla, etteivät ne tuntuneet häiritseviltä. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki salin katon ja valaisinten luminansseista ja kuvassa 8 yhden ikkunaseinän luminanssit mitattuina kuvassa 12 merkityssä pisteessä.



Kuva 7: Esimerkki PK3 paperisalin katon luminansseista katsottaessa suoraan valaisimeen. Kaikki arvot ovat yksikössä  $\frac{cd}{m^2}$ .

Moottorivarastossa valaisimet sen sijaan tuntuivat häiritsevän kirkkailta ylemmille hyllyille katsottaessa etenkin matalammassa pikkutilassa. Kuvissa 9 ja 10 on esitetty luminanssiarvot kuvaan 15 merkitystä pisteestä katsottuna avoimeen tilaan sekä ylähyllylle.

Nykyisen valaistuksen häikäisy- eli UGR-indeksi määritettiin näiden mittausten pohjalta standardissa [4] esitetyllä yhtälöllä 7 ja tulokset on esitetty taulukossa 5.

$$UGR = 8 * \log_{10} \left( \frac{0,25}{L_B} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right) \quad (7)$$

jossa

- $L_B$  on ympäristön keskimääräinen taustaluminanssi [ $\frac{cd}{m^2}$ ]
- $L$  on tarkasteltavan valaisimen valaisevien osien luminanssi [ $\frac{cd}{m^2}$ ] havaitsijaa kohti
- $\omega$  on avaruuskulma, jossa tarkasteltava valaisin näkyy
- $p$  on tarkasteltavan valaisimen sijaintikerroin (ks. kuva 11), joka määrittää valaisimen sijainnin näkökentässä.



Kuva 8: Esimerkki PK3 paperisalin ikkunaseinän luminansseista. Kaikki arvot ovat yksikössä  $\frac{cd}{m^2}$ .



Kuva 9: Esimerkki moottorivaraston luminansseista. Kaikki arvot ovat yksikössä  $\frac{cd}{m^2}$ .



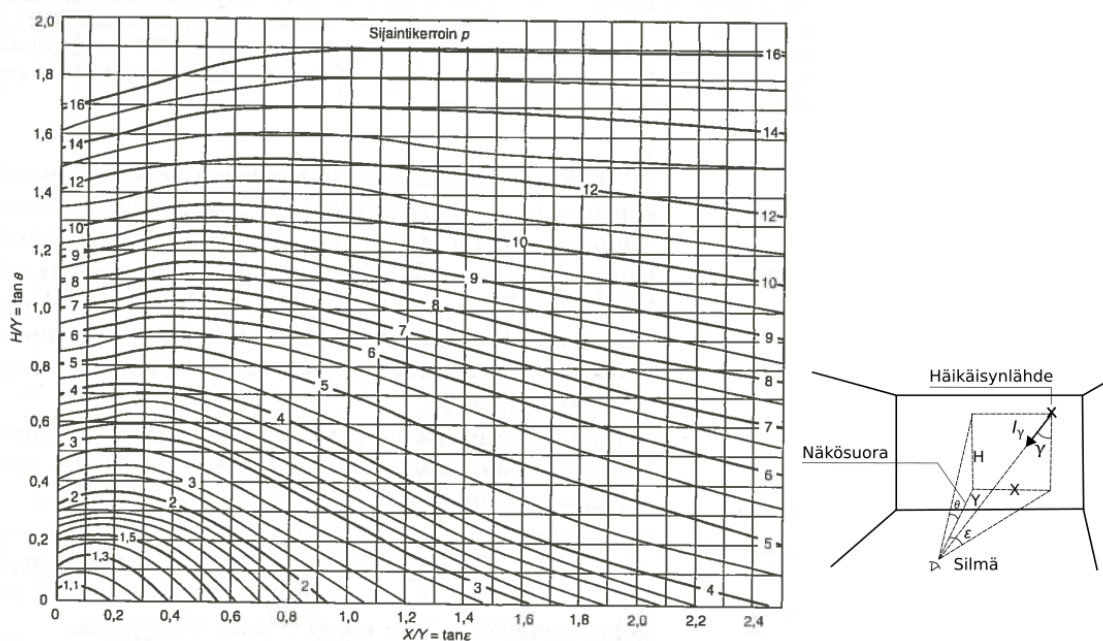
Kuva 10: Esimerkki moottorivaraston hyllyn luminansseista. Kaikki arvot ovat yksikössä  $\frac{cd}{m^2}$ .

Kuvien 7, 8, 9 ja 10 valaisimille laskettiin UGR-indeksit kaavan 7 avulla. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 5. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä E. Taulukosta 5 nähdään, että UGR-indeksin raja ylittyy mitatuissa pisteissä vain paperisälissä suoraan valaisimeen katsottaessa.

Taulukko 5: UGR-häikäisyindeksin lasketut keskiarvot kuvien 7–10 tilanteissa.

Kuva	kuva 7	kuva 8	kuva 9	kuva 10
UGR	25,4	22,5	14,5	5,6

Laskelmien lisäksi DIALux-ohjelmalla tehtiin arviot UGR-indekseistä. Mallinnuksen tulokset on esitetty luvussa 4.3 ja laskettujen sekä mallinnettujen häikäisyindeksien arvoja on vertailtu luvussa 4.3.



Kuva 11: Sijaintikertoimen määrittäminen näkösuoran Y, häikäisylähteen korkeuden H ja leveyden näkösuorasta X avulla. [23, s. 186]

#### 4.2.4 Värilämpötila ja värintoistoindeksi

Värilämpötilamittaukset tehtiin Konica Minoltan CL-500A spektoradiometrillä, ja koska mittaukset tehtiin samalla mittarilla kuin valaistusvoimakkuusmittaukset, mitattiin värilämpötilat ja värintoistoindeksit samoissa liitteen B kuvassa B2 määritellyissä pisteissä. Mittausten tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 6 ja tarkemmat tulokset liitteessä C. Taulukosta nähdään ensinnäkin päivänvalon vaikutus värilämpötilaan ja toisaalta kuinka epätasaisia värilämpötila ja värintoistoindeksi ovat. Värilämpötilan erot huomasi myös silmämääräisesti, kuten kuvasta 3:kin nähtiin. Moottorivarastossa muutama lamppu oli vaihdettu suurpainainenatriumlamppuun, mikä näkyy selkeästi mittaustuloksissa. Värintoistoindeksi on molemmissa tiloissa kuitenkin enimmäkseen standardin SFS-EN 12464-1 [4] määrittämien rajojen yläpuolella.

### 4.3 Nykyisen asennuksen mallinnus

Nykyisestä asennuksesta tehtiin yksinkertaistettu mallinnus DIALux-ohjelmistolla. Molemmat tutkittavat tilat ovat suuria ja monimutkaisia koneineen ja hyllyineen, joten malleista täytyi tehdä hyvin yksinkertaisia, jotta laskenta-aika pysyisi järkevänä. Malliin sisällytettiin tehdaskäynnillä kerätty tieto rikkinäisistä valaisimista, valaisinten iästä, siltanosturien paikoista sekä mittauksista lasketut pintojen heijastussuhteet. Tässä luvussa on esitetty mallinnuksesta saadut tulokset valaistusvoimakkuudesta, häikäisystä ja päivänvalon osuudesta.

Taulukko 6: Mitattujen värilämpötilojen ja värintoistoindeksien minimi- ja maksimi-arvot sekä pyöristetyt keskiarvot eri tiloissa.

Tila	Paperisali PK3 (päivä)	PK3 (ilta)	Varasto
$T_{max}$ [K]	6 232	5 518	5 760
$T_{min}$ [K]	4 406	2 991	3 738
$T_{avg}$ [K]	4 901	5 002	4 984
$R_{a,max}$	97	95	76
$R_{a,min}$	81	79	57
$R_{a,avg}$	91	85	61

#### 4.3.1 Paperisali

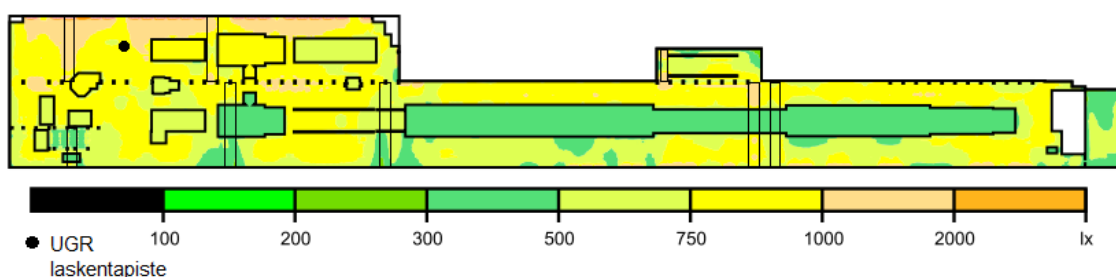
Paperikone mallinnettiin erikokoisilla kuutioilla ja rullat, robotit, putkistot ja hihnat jätettiin kokonaan mallintamatta. Laskelmat suoritettiin sekä päivänvalolla että ilman, kuten mittauksetkin.

DIALux-mallinnuksessa käytetyt parametrit:

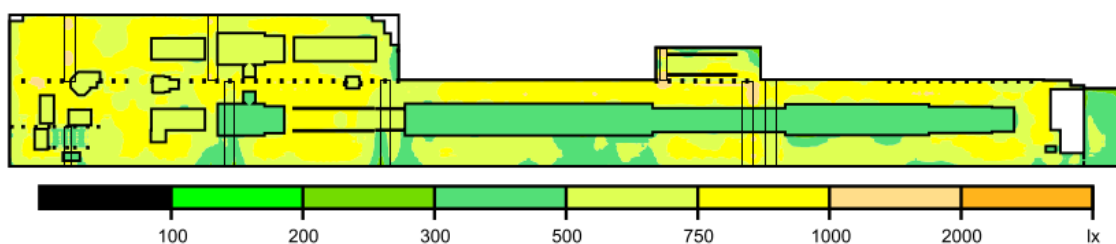
- valaisimet ja lamput
  - 906 kpl Regular 6242.400/V1, HQI-BT 400 W/D (117 rikkinäisiä)
  - 15 kpl Teollisuusloiste 6441, 2x Osram T8 58 W
- materiaalit ja heijastussuhteet
  - maalattua betonia
    - \* seinät: 63 %
    - \* lattia: 46 %
    - \* katto: 63 %
  - kaakeli
    - \* lattia: 26 %
  - koneet 40 %
  - alenemakerroin 0,80
- paikka
  - "Helsinki" N 60,1° E 23,9°, suuntaus 90° pohjoiseen
- poissaolokerroin
  - 0,0
- aktiivinen käyttöprofiili
  - paperi ja paperituotteet: Paperin valmistus ja työstö, paperi- ja pahvikoneet, kartongin valmistus
  - käyttötason korkeus 1,00 m (mittauskorkeus)

- lamppujen ja valaisinten huoltoväli 12 vuotta pahimman tilanteen mukaisesti
- päivänvalolaskelma
  - taivas keskimäärin, 4.4.16 klo 16.00, suora auringonvalo

Kuvassa 12 on esitetty päivänvalolla ja ilman tehtyjen DIALux-mallinnusten valaistusvoimakkuuslaskelmien tulokset väärävärein ilmaistuna. Laskettu keskimääräinen valaistusvoimakkuus on 709 lx. Laskelmien isolux-käyrät ja tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä F.



(a) päivänvalolla

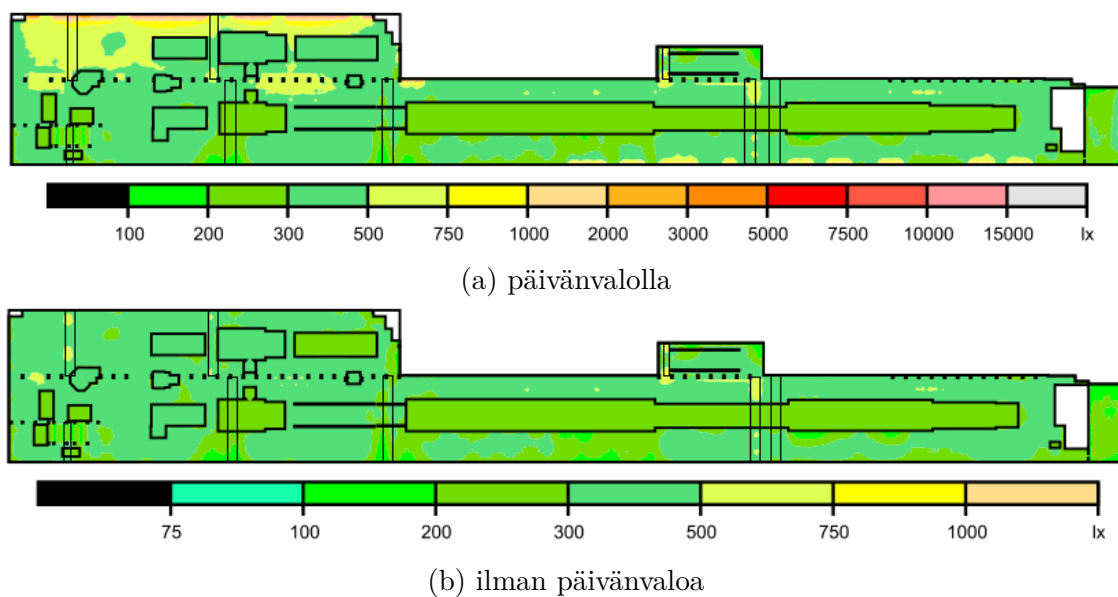


(b) ilman päivänvaloa

Kuva 12: Paperisalin laskelman tulokset väärävärein ilmaistuna alkuperäisellä valovirralla rikkinäiset valaisimet huomioiden sekä (a) päivänvalolla että (b) ilman. Nosturit on merkitty mittaushetkiä vastaaviin paikkoihin. (a)-kuvaan on lisäksi merkitty häikäisyindeksin laskentapiste.

Laskettu ja mitattu keskimääräinen valaistusvoimakkuus eroavat huomattavasti. Nykyiset valaisimet ja lamput ovat jo todella vanhoja (7–12 vuotta) verrattuna suositeltuun vaihtoväliin (4 vuotta), jonka aikana valaistusvoimakkuus on jo laskenut 30–40 % [24]. Tästä syystä laskelmat suoritettiin myös 50 %-teholla. Tuloksena saatiin kuvan 13 valaistusvoimakkuudet. Nämä tulokset eroavat vain alle 50 lx mitatuista arvoista, kuten nähdään taulukosta 7. Taulukosta 7 nähdään myös, että valaistuksen tasaisuus on sama kuin mittauksista laskettu arvo.



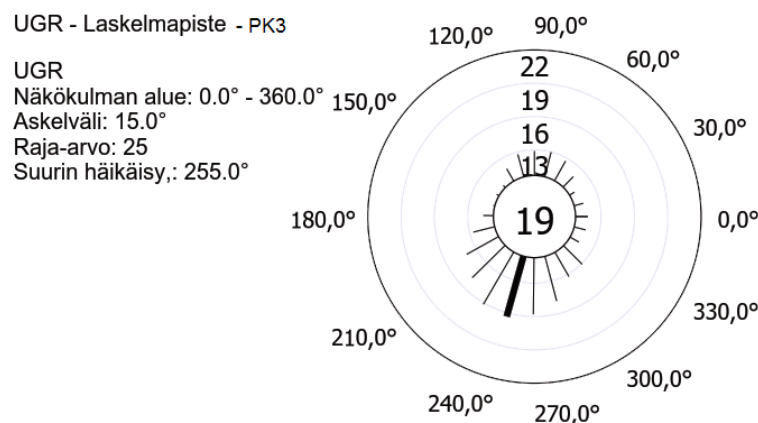


Kuva 13: Paperisalin laskelman tulokset 50 % valaistustasolla (a) päivänvalolla ja (b) ilman mallinnettuna.

Taulukko 7: Paperisalin mitattujen ja mallinnettujen kohtisuorien valaistusvoimakkuuksien vertailua.

	päivä				yö			
	$\bar{E}_{max}$ [lx]	$\bar{E}_{min}$ [lx]	$\bar{E}_m$ [lx]	$U_d$	$\bar{E}_{max}$ [lx]	$\bar{E}_{min}$ [lx]	$\bar{E}_m$ [lx]	$U_d$
mittaukset	11 310	120	513	0,23	424,2	59	304	0,20
laskelmat								
100 %	17 256	190	856	0,22	1 750	157	709	0,22
50 %	16 848	101	501	0,20	875	78	354	0,22

Kuvan 8 pisteessä laskettiin häikäisyindeksin arvo myös DIALuxilla. Laskentapisteen paikka on merkitty kuvaan 12a ja tulos on esitetty kuvassa 14. Siitä nähdään, että suurimmillaan häikäisyindeksi on noin 19, kun pisteen luminanssimittauksista laskettu häikäisyindeksi oli 22,5. Mallinnettu häikäisy on eri suuntaan ja paljon matalampi kuin mitattu arvo, koska DIALux ei ota päivänvaloa huomioon häikäisyn arvioinnissa.



Kuva 14: Paperisalin häikäisylaskentapisteen tulokset.

#### 4.3.2 Moottorivarasto

Moottorivaraston hyllyt mallinnettiin ensin melko tarkasti, mutta laskenta-ajan oltua 23 tuntia, päätettiin mallia yksinkertaistaa. Hyllyt mallinnettiin erikokoisina kuutioina ja irtotavarat ja puominostin jätettiin mallintamatta. Laskelmat tehtiin nykyisen tilanteen mukaisesti olettaen, että valot ovat päällä ympäri vuorokauden.

DIALux-mallinnuksessa käytetyt parametrit:

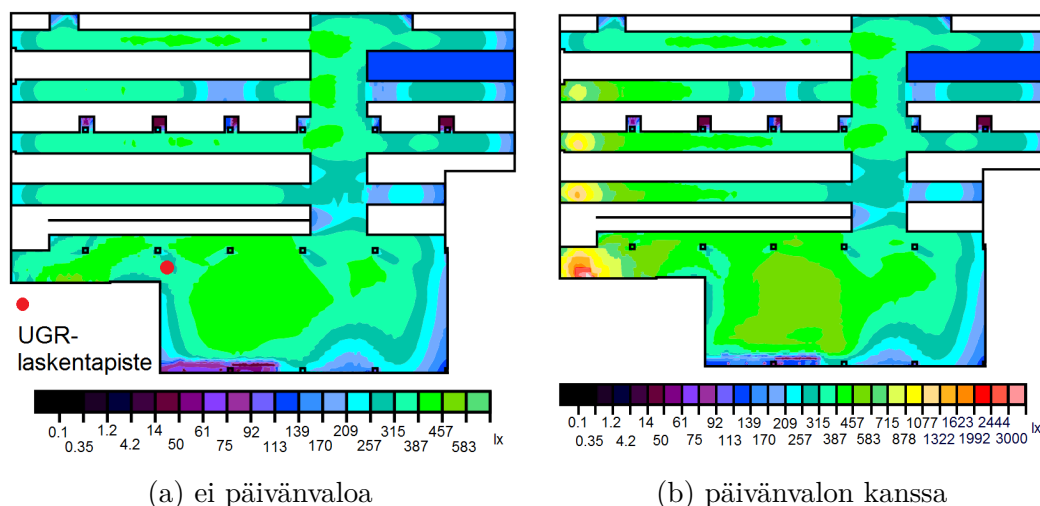
- valaisimet ja lamput
  - 70 kpl Laajasäteilijä 6231.405/V3 250 W, HQI-T 205 W/D (5 rikkinäisiä)
  - 1 kpl Teollisuusloiste 6441, 2x Osram T8 58 W
- materiaalit ja heijastussuhteet
  - betoni
    - \* seinät: 53 %
    - \* lattia: 14 %
    - \* katto: 53 %
  - hyllyt: 52 %
- paikka
  - "Helsinki" N 60,1° E 23,9°, suuntaus 90° pohjoiseen
- poissaolokerroin
  - 0,0
- aktiivinen käyttöprofiili
  - Varastointi- ja jäähdytystilat: varastotilat
  - käyttötason korkeus 1,00 m (mittauskorkeus)
  - lamppujen ja valaisinten huoltoväli 5 vuotta
- Päivänvalolaskelma



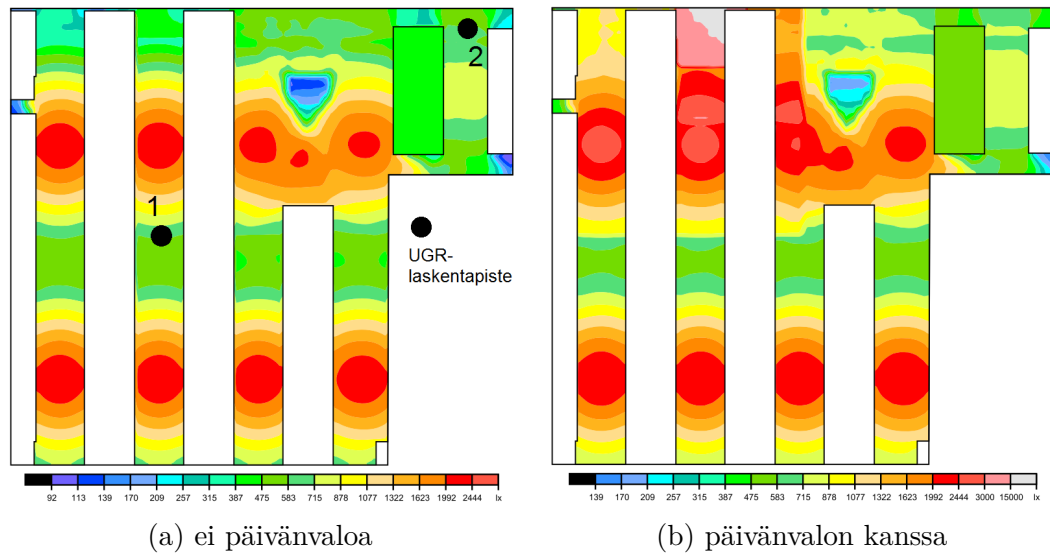
– taivas keskimäärin, 4.4.16 klo 16.00, suora auringonvalo

Kuvissa 15–17 on esitetty edellä annettujen parametrien avulla ilman päivänvaloa ja sen kanssa lasketut valaistusvoimakkuudet vääräväreinä. Laskelmien tuloksia on vertailtu taulukoissa 8a ja 8b. Taulukoista nähdään, että mallinnetut valaistusvoimakkuudet ovat huomattavasti suurempia, kuin mitatut arvot. Myös moottorivaraston valaisimet ovat suhteellisen vanhoja, joten valovirran alenema näkyy mittaustuloksissa. Päivällä tehdyissä mittauksissa ei suoraa auringonvaloa osunut mittauspisteisiin, ja siksi maksimiarvot jäivät paljon pienemmiksi, kuin mallinnuksessa. Valaistuksen tasaisuus sen sijaan vaihtelee melko paljon mitatuista arvoista. Tämä johtuu pitkälti siitä, että mittaukset tehtiin vain käytävillä ja DIALux laskee myös pimeiden nurkkien valaistusvoimakkuudet.

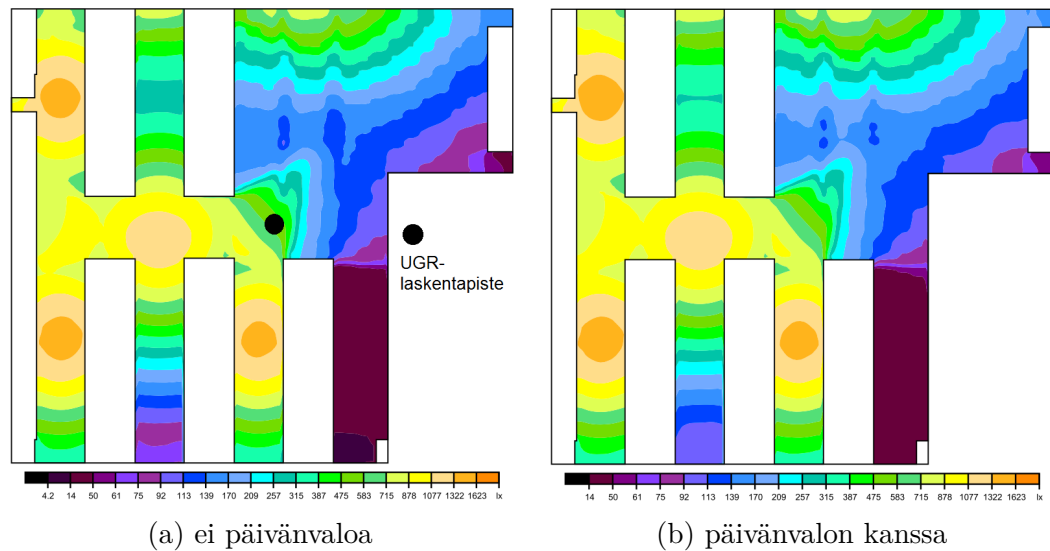
Isolux-käyrät ja tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä F. Päivänvalon osuus moottorivaraston valaistuksessa on hyvin pieni, kuten kuvista 15–17 nähdään. Mittauksissa ja laskelmissa huomattiin, että sillä on vaikutusta vain aivan ikkunoiden lähellä. Mallinnuksen mukaan päivänvalokerroin on parhaimmillaan vain 0,19 %, joten päivänvalon mukaan säätävällä valaistuksella ei saataisi merkittäviä säästöjä.



Kuva 15: Moottorivaraston isomman tilan laskelman tulokset käyttötasolla sekä (a) pimeällä että (b) päivänvalolla laskettuna. (a)-kuvaan on lisäksi merkitty häikäisy-laskentapisteen paikka.



Kuva 16: Moottorivaraston pienemmän tilan alakerran laskelman tulokset käyttötasolla sekä (a) pimeällä että (b) päivänvalolla laskettuna. (a)-kuvaan on lisäksi merkitty häikäisylaskentapisteen paikat.



Kuva 17: Moottorivaraston pienemmän tilan yläkerran laskelman tulokset käyttötasolla sekä (a) pimeällä että (b) päivänvalolla laskettuna. (a)-kuvaan on lisäksi merkitty häikäisylaskentapisteen paikka.

Taulukko 8: Moottorivarastossa mitattujen ja mallinnettujen valaistusvoimakkuuksien vertailu (a) yöllä ja ilman päivänvaloa sekä (b) päivällä ja päivänvalon kanssa

(a) yöllä ja ilman päivänvaloa						
	mittaukset			laskelma		
	iso tila	alakerta	yläkerta	iso tila	alakerta	yläkerta
$\bar{E}_{max}$ [lx]	362	2 133	872	559	2 338	1 435
$\bar{E}_{min}$ [lx]	62	234	87	0,1	99	14
$\bar{E}_m$ [lx]	245	800	244	327	1 114	488
$U_d$	0,25	0,29	0,36	0,00	0,40	0,01

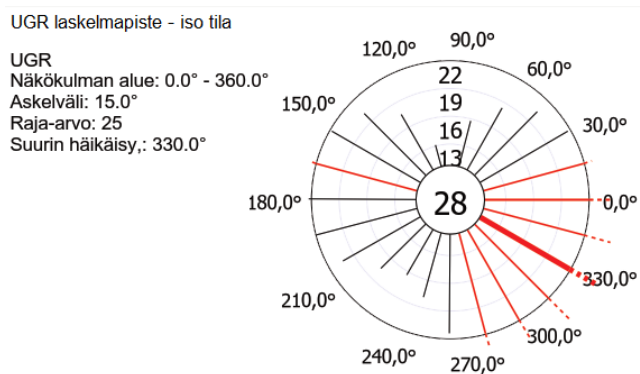
  

(b) päivällä ja päivänvalon kanssa						
	mittaukset			laskelma		
	iso tila	alakerta	yläkerta	iso tila	alakerta	yläkerta
$\bar{E}_{max}$ [lx]	463	2 133	872	60 950	68 831	1 452
$\bar{E}_{min}$ [lx]	147	234	87	0,1	161	25
$\bar{E}_m$ [lx]	350	800	244	395	1 764	502
$U_d$	0,42	0,29	0,36	0,00	0,09	0,05

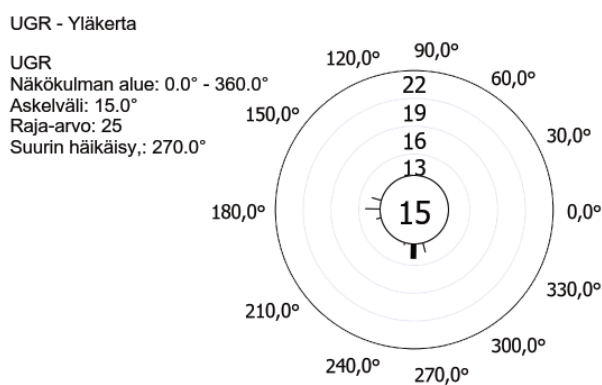
Mallinnetut ja mitatut arvot vaihtelevat melko paljon. Tämä johtuu pitkälti mitauspisteiden ja DIALuxin laskentapisteen eriävyydestä. Mittauspisteet olivat vain käytävien keskellä, jolloin nurkkien ja seinänvierustusten alhaiset valaistusvoimakkuudet jäivät mittaamatta. DIALux kuitenkin mallintaa koko tilan, joten minimi- ja keskiarvot voivat olla kaukana mitatuista arvoista. Tästä syystä myös valaistuksen tasaisuuden arvio DIALuxissa voi olla kaukana mitatusta.

Standardissa SFS-EN 12464-1 [4] on varastotiloille määritelty myös keskimääräinen pystysuora valaistusvoimakkuus (200 lx) hyllyjen reunoille (ks. taulukko 2). Mallinnuksessa tämä otettiin huomioon ja laskelmista saatiin keskimääräisiksi pystysuoriksi valaistusvoimakkuuksiksi pienemmässä tilassa 20,9–953 lx ja isommassa tilassa 150–276 lx eri hyllyjen etureunoilla. Korkeimmat arvot olivat pienemmän tilan alakerrassa ja pienimmät arvot yläkerran rikkinäisen lampun viereisellä hyllyllä. Isommassa tilassa 70 % hyllyistä täytti standardin vaatimuksen. Pienemmässä tilassa 80 % täytti vaatimuksen, mutta 62 % ylitti 600 lx ja häikäisy voi olla tilassa ongelma.

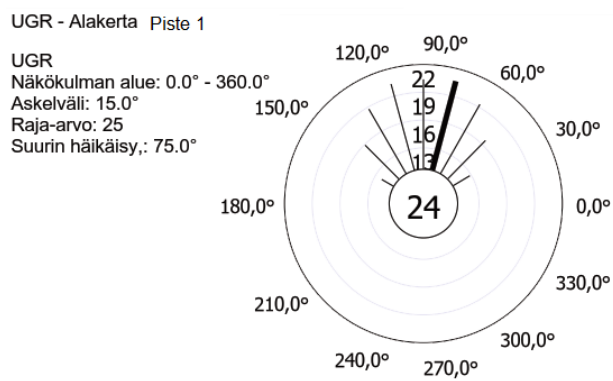
Häikäisylaskelmia tehtiin myös DIALuxilla kuvissa 15a, 16a ja 17a merkityissä pisteissä 1,5 m korkeudella lattiapinnasta. Laskelmien tulokset on esitetty kuvissa 18–21. Näistä isomman tilan piste on ainoa, josta häikäisyä arvioitiin luminanssimitauksilla, ja indeksin arvoksi saatiin 14,5. DIALux-mallin perusteella kyseisen alueen (280°–350°) UGR-indeksin arvo olisi yli 25. Häikäisyn ehkäisy on siis yksi uudessa valaistuksessa huomioon otettava kriteeri.



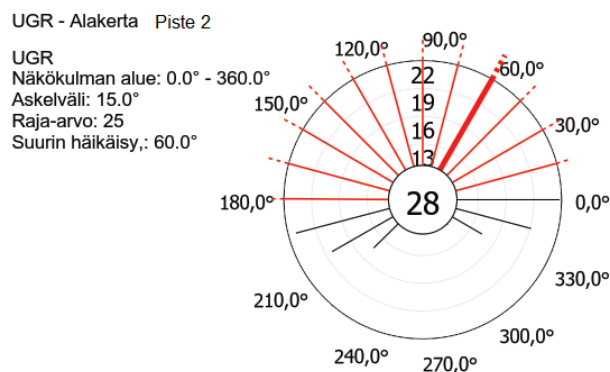
Kuva 18: Ison tilan häikäisylaskentapisteen tulokset.



Kuva 19: Pienen tilan yläkerran häikäisylaskentapisteen tulokset.



Kuva 20: Pienen tilan alakerran häikäisylaskentapisteen 1 tulokset.



Kuva 21: Pienen tilan alakerran häikäisylaskentapisteen 2 tulokset.

#### 4.4 Sähkönkulutus

Taulukossa 9 on esitetty laskennalliset vuosikustannukset nykyiselle valaistukselle tutkittavissa tiloissa 3.6.2016 voimassa olleella sähkön hinnalla: 43,8 €/MWh [22]. Vuosikustannus laskettiin kaavalla 8.

$$\text{kustannus} = \text{pätöteho} * \text{lamppujen määrä} * \text{polttoaika} * \text{sähkön hinta} \quad (8)$$

Taulukko 9: Nykyisten valaistusratkaisujen vuosittainen sähkönkulutus

Tila	Paperisali PK3		Moottorivarasto	
Valaisinmalli	6242	6441	6231	6441
Liitäntäteho [W]	460	142	275	142
Valaisinten määrä [kpl]	906	15	70	1
Polttoaika [h/vuosi]	8 760		8 760	
Sähkönkulutus yhteensä [MWh/vuosi]	3 670		170	
Sähkön hinta [€/MWh]	43,8			
Energiakustannus [€/vuosi]	159 900	820	7 380	55
Yhteensä [€/vuosi]	160 720		7 440	

## 5 Case-tutkimuksen valaistussuunnitelmat

Tässä luvussa esitetään käsiteltyjen tilojen uudet valaistussuunnitelmat ja niiden mallintaminen DIALux-ohjelmistolla. DIALux-ohjelmistolla mallinnettiin yhteensä 20 kuuden eri valmistajan teollisuuteen tarkoitettua valaisinta erilaisilla tehoilla ja valonjaoilla ja niistä parhaan valaistustuloksen järkevällä valaisinmäärällä antaneet kolme ratkaisua tilaa kohden sisällytettiin tähän työhön. Mallinnuksessa arvioitiin valaistusvoimakkuudet, valaistuksen tasaisuus, luminanssit, häikäisy sekä energiankulutus. Valinnassa otettiin lisäksi huomioon valaisinten hinnat sekä käyttöiät. Tässä luvussa esitellään valitut valaisimet ja mallinnuksen tulokset.

### 5.1 Paperisali PK3

Standardi SFS-EN 12464-1 [4] määrittelee paperinvalmistukseen käytetyille tiloille 300 luksin keskimääräisen valaistusvoimakkuuden. Tämän tutkimuksen kohteessa se ei kuitenkaan ole riittävä, vaan asiakkaan toiveesta tilaan halutaan 500 luksin keskimääräinen valaistusvoimakkuus ja uusi ledivalaistus suunniteltiin tätä noudattaen. Pohjoispäädyn varasto-osaan sekä hylsyvaraston alle 300 lx on riittävä.

Paperisalin valaisimet on asennettu roikkumaan katon ontelolaatoista ja näiden lisäksi kattotuolit määrittävät valaisinten paikat. Näistä syistä valaisinten paikkoja ei voida uudessa suunnitelmassa muuttaa, mutta valaisinten määrää voidaan vähentää mahdollisuuksien mukaan. Käytettävien valaisinten täytyy siis olla niin tehokkaita, että enintään nykyinen valaisinten määrä riittää tuottamaan halutun valaistuksen. Lisäksi täytyy ottaa huomioon tilan maksimilämpötila: +40 °C.

#### 5.1.1 Valittujen valaisinten esittely

Paperisalin uusiksi valaisimiksi valittiin:  
kattoon

- Philips GentleSpace gen2
- I-Valo VEGA L
- Easy LED PRO 8X ja 12X

hylsyvaraston alle

- Fagerhult InduLED
- Philips Pacific LED
- I-Valo LEDA

Kuvissa 22–28 on esitelty valitut valaisinmallit sekä valmistajien antamat perustiedot.



Kuva 22: Philips GentleSpace gen2 [25]

#### **Valaisin A:**

Philips GentleSpace gen2

- Liitântäteho: 180 W
- Valaisimen valovirta: 24 900 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: NB (kapea)
- Käyttöikä: 70 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  $-30\text{ °C} - +45\text{ °C}$



Kuva 23: I-Valo VEGA L [26]

#### **Valaisin B:**

I-Valo VEGA L

- Liitântäteho: 383 W
- Valaisimen valovirta: 34 600 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: kapea
- Käyttöikä: 50 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  $-40\text{ °C} - +50\text{ °C}$

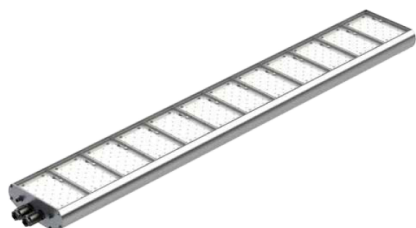


Kuva 24: Easy LED PRO 8X [27]

#### **Valaisin C:**

Easy LED PRO 8X

- Liitântäteho: 240 W
- Valaisimen valovirta: 26 500 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako:  $30^\circ$
- Käyttöikä: 80 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  $-40\text{ °C} - +40\text{ °C}$



Kuva 25: Easy LED PRO 12X [27]

#### Valaisin D:

Easy LED PRO 12X

- Liitântäteho: 360 W
- Valaisimen valovirta: 39 800 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: 30°
- Käyttöikä: 80 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  
-40 °C – +40 °C



Kuva 26: Philips Pacific LED [25]

#### Valaisin E:

Philips Pacific LED WT460C

- Liitântäteho: 51,5 W
- Valaisimen valovirta: 6 400 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: O (leveä)
- Käyttöikä: 70 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  
-30 °C – +45 °C

#### Valaisin F:

I-Valo LEDA



Kuva 27: I-Valo LEDA [26]

- Liitântäteho: 60 W
- Valaisimen valovirta: 5 500 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: leveä
- Käyttöikä: 50 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  
-30 °C – +45 °C



**Valaisin G:**  
Fagerhult InduLED



Kuva 28: Fagerhult InduLED [11]

- Liitäntäteho: 52 W
- Valaisimen valovirta: 6 400 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: keskileveä
- Käyttöikä: 55 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  
-25 °C – +25 °C

Mallinnus tehtiin koko tilalle kerralla kolmella erilaisella ratkaisulla:

- Ratkaisu 1: A (GentleSpace) & E (Pacific)
- Ratkaisu 2: B (VEGA) & F (LED A)
- Ratkaisu 3: C (PRO 8X), D (PRO 12X) & G (InduLED)

Taulukossa 10 on vertailtu näitä valaisimia ja mallinnuksen antamia valaistustuloksia. Liitteessä G on esitetty pohjakuvat, joista nähdään uudet valaisinten paikat, sekä mallinnusten tulokset vääräväreinä.

Taulukko 10: Paperisaliin valittujen valaisinvaihtoehtojen ja nykyisen asennuksen vertailua.

Ratkaisu	Valaisimet	Teho [W]	kpl	$\bar{E}_m$ [lx]	$\bar{E}_{min}$ [lx]	$\bar{E}_{max}$ [lx]	$U_d$	UGR
nykyinen	Regular 6441	400 142	906 15	709	157	1 750	0,22	22,5
1	A (GentleSpace) E (Pacific)	180 51,5	750 15	615	129	858	0,20	12
2	B (VEGA) F (LED A)	383 60	618 15	711	149	1 175	0,20	18
3	C (PRO 8X) D (PRO 12X) G (InduLED)	240 360 52	339 206 15	576	91	911	0,16	<10

### 5.1.2 Valaistuksen säätö

Koska paperisali on ympärivuorokautisessa käytössä, eikä päivänvaloa juurikaan ole, ovat valaistuksen säätömahdollisuudet pienet. Ainoa, missä säädöstä voisi olla hyötyä, on valaisinten eliniän pidentäminen. Vakiovalosäädöllä voidaan valovirta pitää vakiona muuttamalla käytettyä tehoa valovirran aleneman vaikuttaessa valaisimen vanhetessa.

Paperisalin valaistuksen johdotus on asennettu katon ontelolaattojen sisään ja valaisimet on kiinnitetty näihin laattoihin. Tämä tekee johdotuksen muuttamisesta erityisen hankalaa ja siksi uuden valaistuksen säätö pitäisi pystyä toteuttamaan langattomasti tai nykyisellä kaapeloinnilla.

Vakiovalonsäätö voidaan toteuttaa niin, että alussa valaisinten teho asetetaan 80 %:iin ja valoisuusanturi tai useampi mittaa tilan valaistustasoa. Ajan myötä, kun valovirta alenee, ilmoittaa valoisuusanturi siitä ohjaimelle, joka nostaa käytettyä tehoa pitääkseen valaistustason vakiona.

Mallinnukset tehtiin myös 80 % teholla ja valitut valaisimet sopivat hyvin tähänkin käyttöön. Valaistusvoimakkuuksia on vertailtu taulukossa 11 ja liitteessä G on esitetty mallinnusten tulokset täydellä sekä alennetulla teholla.

Taulukko 11: Paperisalin täydellä ja alennetulla teholla lasketun valaistuksen vertailua eri ratkaisulla.

Ratkaisu	1		2		3	
Teho [%]	100	80	100	80	100	80
$\bar{E}_m$ [lx]	615	492	711	569	576	461
$\bar{E}_{min}$ [lx]	129	103	149	119	91	73
$\bar{E}_{max}$ [lx]	858	687	1 175	940	911	729
$U_d$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,16	0,16
UGR	12	11	18	17	<10	<10

## 5.2 Moottorivarasto

Standardi SFS-EN 12464-1 [4] määrittelee varastojen keskimääräiseksi valaistusvoimakkuudeksi 100 lx. Asiakas kuitenkin toivoi tänne kirkkaampaa valaistusta, joten käytettiin uuden valaistuksen suunnittelun pohjana noin 200–300 lx.

Moottorivarastossa valaisinten asennuskorkeus ei ole vakio, joten erikorkuisille tiloille täytyy valita erilaiset valaisimet tasaisen valaistuksen saavuttamiseksi. Isoon tilaan valitaan tehokkaammat valaisimet kuin kaksikerroksiseen pieneen tilaan ja lisäksi eri kerroksiin voidaan tarvittaessa valita erilaisilla valonjaoilla olevat versiot. Varaston valaistus ja sen kaapelointi on asennettu kaapelihyllyihin, joten järjestelmän muuttaminen on helppoa.

### 5.2.1 Valittujen valaisinten esittely

Moottorivaraston tutkittaviksi uusiksi valaisimiksi valittiin isoon tilaan

- Philips Pacific LED
- Fagerhult InduLED
- I-Valo DORA+

pieneen tilaan

- I-Valo LUMI
- Philips CoreLine Waterproof
- Easy LED PRO 100

Nämä on esitelty kuvissa [29–34](#).



Kuva 29: Philips Pacific LED [25]

#### Valaisin A:

Philips Pacific LED WT460C

- Liitântäteho: 51,2 W
- Valaisimen valovirta: 6 400 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: NB
- Käyttöikä: 70 000 h
- Sallittu käyttölämpötila: -30 °C – +45 °C

#### Valaisin B:

Fagerhult InduLED



Kuva 30: Fagerhult InduLED [11]

- Liitântäteho: 52 W
- Valaisimen valovirta: 6 400 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: Keskipileä
- Käyttöikä: 55 000 h
- Sallittu käyttölämpötila: -25 °C – +25 °C



Kuva 31: I-Valo DORA+ [26]

### Valaisin C:

#### I-Valo DORA+

- Liitântäteho: 65 W
- Valaisimen valovirta: 8 200 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: keskileveä
- Käyttöikä: 50 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  
-40 °C – +60 °C



Kuva 32: I-Valo LUMI [26]

### Valaisin D:

#### I-Valo LUMI

- Liitântäteho: 21 W
- Valaisimen valovirta: 2 200 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: leveä
- Käyttöikä: 50 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  
-5 °C – +35 °C



Kuva 33: Philips CoreLine Waterproof [25]

### Valaisin E:

#### Philips CoreLine Waterproof

- Liitântäteho: 20 W
- Valaisimen valovirta: 2 200 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: 60°
- Käyttöikä: 50 000 h
- Sallittu käyttölämpötila:  
-20 °C – +35 °C



Kuva 34: Easy LED PRO 100 [27]

#### Valaisin F:

Easy LED PRO 100

- Liitântäteho: 15 W
- Valaisimen valovirta: 1 600 lm
- Värilämpötila: 4 000 K
- Valonjako: 80° ja 150°
- Käyttöikä: 80 000 h
- Sallittu käyttölämpötila: -40 °C – +50 °C

Mallinnukset tehtiin kolmella erilaisella ratkaisulla:

- Ratkaisu 1: A (Pacific) & D (LUMI)
- Ratkaisu 2: B (InduLED) & E (CoreLine)
- Ratkaisu 3: C (DORA+) & F (PRO 100)

Valaisimia ja niiden tuottamaa valaistusta on vertailtu taulukossa 12. Pohjakuivat, joissa näkyy uusien valaisinten paikat sekä mallinnusten tulokset väärävärein löytyvät liitteestä G. Taulukossa on myös esitetty keskimääräinen pystysuora valaistusvoimakkuus  $E_{pysty}$  hyllyjen etureunassa. Käytännössä yksikään ratkaisu ei täytä standardin määrittämää 200 luksin valaistusvoimakkuutta, mutta tämä pitäisi varmistaa mittaamalla. Hyllyihin kohdistuvaa valoa voidaan lisätä tarvittaessa kohdevalaisimilla.

Näiden lisäksi nykyiseen I-Valon 6231-valaisimeen on saatavilla RetroFit-ledimoduuli (6721LED). Pelkkä moduulin vaihto on 25 % halvempaa kuin uusi valaisin. 6721-valaisimen valonjako on leveä, jonka myötä nykyinen valaisinten määrä ei riitä lähes 300 lx valaistusvoimakkuuden saavuttamiseksi isossa tilassa. Pieneen tilaan näillä valaisimilla taas on liian suuri teho, joten RetroFit-ratkaisu yhdistettiin valaisimen D (LUMI) kanssa. Isoon tilaan sopiva valaistus on mahdollista toteuttaa asentamalla RetroFit-moduulit nykyisiin 57 valaisimeen sekä lisäksi 19 6721LED-valaisinta. Myös nykyisten valaisinten paikkoja joudutaan muuttamaan. Tällä ratkaisulla häikäisyindeksi on DIALux-mallinnuksen mukaan 26,8, joten ratkaisu ei ole paras vaihtoehto. Ratkaisu on kuitenkin sisällytetty taulukkoon 12 sekä luvun 6 elinkaarikustannuslaskelmiin.

#### 5.2.2 Valaistuksen säätö

Moottorivaraston käyttöaika on hyvin pieni, vain muutaman tunnin päivässä lyhyitä aikoja kerrallaan [22]. Moottorivaraston valaistus mallinnettiin sekä täysipäiväisellä käytöllä että arvioidulla normaalilla päivittäisellä käyttöajalla, noin neljä tuntia.

Näitä tuloksia vertaamalla nähdään, että pelkällä valaistuksen läsnäolo-ohjauksella voitaisiin säästää 83 % ilman ohjausta käytetystä energiasta. Päivänvalon osuus tilassa sen sijaan on hyvin pieni, kuten luvun 4.3 päivänvalolaskennan tuloksista nähtiin, eikä päivänvalo-ohjaus siten ole kannattava ratkaisu. Nykyisillä monimetallilampuilla läsnäolo-ohjaus ei käytännössä toimi, sillä lamppujen syttymisaika on niin pitkä. Ledivalaisimet sen sijaan syttyvät välittömästi, joten ne soveltuvat tarkoitukseen hyvin.

Ohjaus voidaan toteuttaa oville ja keskikäytävillä sijoitetuilla liiketunnistimilla, joiden signaalista ohjausjärjestelmä määrää valaisimia syttymään. Voidaan myös ohjelmoida tietyn liiketunnistimen signaalin sytyttävän vain tietyn alueen valaisimet Näin vältetään valaisemasta tarpeettomia alueita ja säästetään lisää energiaa.

Taulukko 12: Moottorivarastoon valittujen valaisinvaihtoehtojen ja nykyisen asennuksen vertailua.

Ratkaisu	tila	Valaisin	Teho [W]	kpl	$\bar{E}_m$ [lx]	$\bar{E}_{min}$ [lx]	$\bar{E}_{max}$ [lx]	$U_d$	UGR	$\bar{E}_{pysty}$ [lx]
nykyinen	iso	6231	250	57	327	0,1	559	0,00	28	208
	yläkerta	6231	250	5	488	14	1 435	0,00	15	182
	alakerta	6231	250	8	1 114	99	2 338	0,40	28	107
	alakerta	6441	142	1						620
1	iso	A (Pacific)	51,5	57	281	0,1	418	0,00	16,2	151
	yläkerta	D (LUMI)	21	12	228	29	381	0,13	24,4	137
	alakerta	D (LUMI)	21	13	269	24	407	0,09	17,4	203
2	iso	B (InduLED)	52	56	240	0	322	0,00	25,2	162
	yläkerta	E (CoreLine)	20	12	250	28	386	0,11	21,9	158
	alakerta	E (CoreLine)	20	13	306	29	429	0,10	14,9	204
3	iso	C (DORA+)	65	57	255	0	363	0,00	23,9	146
	yläkerta	F (PRO 100)(80°)	15	12	253	20	337	0,08	21,8	155
	alakerta	F (PRO 100)(150°)	15	13	220	18	357	0,08	17,9	139
RetroFit	iso	6721 RetroFit	58	76	264	0,1	360	0,00	26,8	178
	yläkerta	D (LUMI)	21	12	234	0,3	380	0,00	24,7	131
	alakerta	D (LUMI)	21	13	281	31	444	0,10	17,5	203

## 6 Tulokset

Tässä osiossa esitetään luvun 3 menetelmillä saadut tulokset luvussa 5 esitellyillä valaisimilla laskettuna. Valaistusratkaisujen elinkaarikustannukset arvioitiin Microsoft Excelillä luvussa 3 esitetyllä nykyarvomenetelmällä, laskemalla kumulatiiviset vuosikustannukset sekä Motivan VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla [2].

Kaikille laskelmille käytettiin seuraavia yhteisiä parametreja:

- Tarkasteluaajan pituus  $N$  on 30 vuotta
- Sähkön hinta on 43,8 €/MWh
- Energiakustannusten vuotuinen kasvu on 2 %
- Huolto- ja asennuskustannusten vuotuinen hinnannousu on 2 %
- Laskentakorko  $p$  on 4 %
- Vuotuinen polttoaika paperisaliissa on 8 760 h ja moottorivarastossa 1 460 h
- Jäännösarvoksi  $R$  arvioidaan 25 % investointikustannuksista (purku- ja kierrätyskustannukset)

### 6.1 Paperisali

#### 6.1.1 Energiankulutuslaskelmat

Taulukossa 9 laskettiin nykyisen valaistuksen sähkönkulutus. Tätä ja luvussa 5 esiteltujen valaisimien energiankulutuslaskelmien tuloksia on vertailtu taulukossa 13.

Taulukosta nähdään, että ledivalaistuksella valaistuksen energiankulutuksesta olisi mahdollista säästää jopa 70 %. Uuden valaistuksen valaistusvoimakkuustavoite on myös pienempi kuin nykyisen valaistuksen ja osa säästöstä johtuu siten pienemmästä valovirrasta. Taulukossa 14 onkin verrattu nykyisen ja uusien järjestelmien kulutusta suhteessa valovirtaan, kun valaisimen käyttöikä on otettu huomioon. Taulukosta nähdään, että lediratkaisut kuluttavat edelleen 20–45 % vähemmän kuin nykyiset monimetalli- ja loistelamppuvalaisimet.



Taulukko 13: Paperisalin valaisinvaihtoehtojen sähkönkulutus (a) kattovalaisimille ja (b) hylsyvaraston valaisimille.

(a) kattovalaisinten sähkönkulutus					
valaisin	Regular	GentleSpace	VEGA L	PRO 8X	PRO 12X
määrä [kpl]	906	750	618	339	206
nimellisteho [W]	460	180	383	240	360
ottoteho yht. [kW]	416,8	135	236,7	155,5	
käyttötunnit [h/vuosi]	8 760				
sähkönhintaa [€/kWh]	0,0438				
energian kustannus [€/vuosi]	159 906	51 798	90 817	59 671	

(b) hylsyvaraston valaisinten sähkönkulutus				
valaisin	6441	Pacific	LEDA	InduLED
määrä [kpl]	15	15	15	15
nimellisteho [W]	142	51,5	60	52
ottoteho yht. [W]	2 130	773	900	780
käyttötunnit [h/vuosi]	8 760			
sähkönhintaa [€/kWh]	0,0438			
energian kustannus [€/vuosi]	817	296	345	299

Taulukko 14: Nykyisen ja uusien valaistusratkaisujen energiankulutus suhteessa valovirtaan (a) kattovalaistukselle ja (b) hylsyvaraston valaistukselle.

(a) kattovalaisimet		(b) hylsyvarasto	
Valaisin	[kWh/Mlmh]	Valaisin	[kWh/Mlmh]
Regular	13,5	6441	13,7
GentleSpace (1)	7,2	Pacific (1)	8,1
VEGA L (2)	11,1	LEDA (2)	10,8
PRO (3)	9,0	InduLED (3)	8,2

### 6.1.2 Elinkaarikustannuslaskelmat

Nykyisen valaistuksen laskentaan käytettiin seuraavia olettamia:

- Monimetallilamppujen hinta 100 €/kpl
- Lamppujen vaihtoväli 10 vuotta
- Valaisimen huoltokustannukset lampun eliniän lopussa kattovalaisimille 220 €/valaisin (sisältäen osat, työvoiman ja henkilönostimen vuokran) [22] ja hylsyvaraston valaisimille 100 €/valaisin

Uusiin valaisimiin käytettiin seuraavia olettamia:

- Uusien kattovalaisimien asennustyön kustannukset 150 €/valaisin
- Uusien hylsyvaraston valaisimien asennustyön kustannukset 50 €/valaisin
- Valaisimien huoltoväli riippuen eliniästä
- Valaistuksen huoltokustannukset eliniän lopussa kattovalaisimille 220 €/valaisin ja hylsyvaraston valaisimille 100 €/valaisin (sisältäen osat, työvoiman ja henkilönostimen vuokran)
- Salivalaistuksen ohjausjärjestelmä jätettiin huomiotta laskelmissa

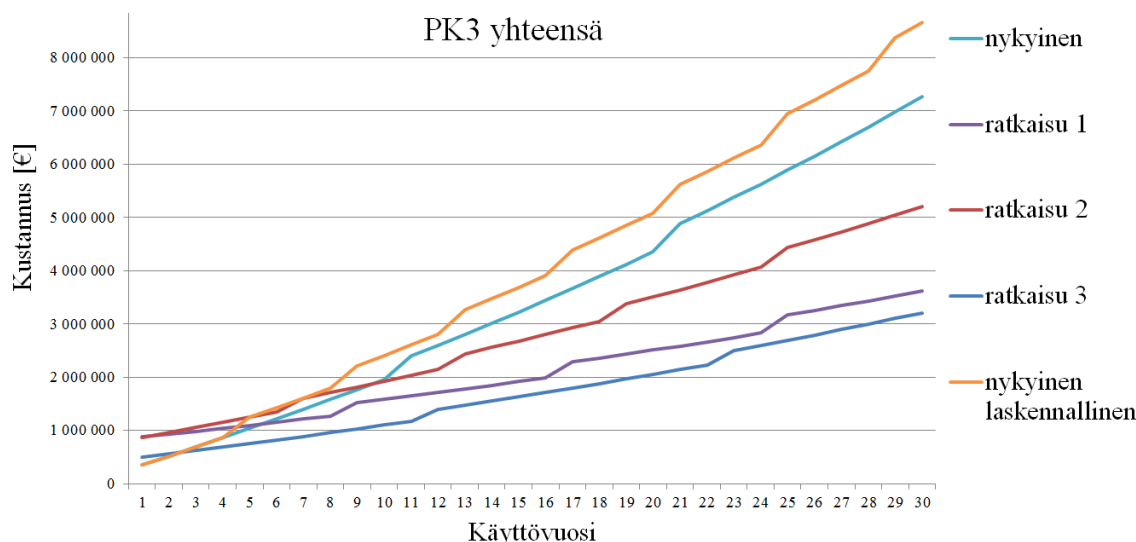
Kattovalaisimet sijaitsevat 16 m korkeudessa, joten niiden huolto- ja asennustyöt vaativat erikoisvälineitä sekä ulkopuolisen asentajan. Hylsyvaraston valaisimet ovat vain 3 m korkeudessa, joten niiden huolto voidaan hoitaa tehtaan omilla resursseilla.

Nykyarvon laskennassa käytettiin 4 % laskentakorkoa ja jakamalla huoltokustannukset tasaisesti huoltovälille, voitiin käyttää yksinkertaistettua kaavaa 4. Eri menetelmillä ja ratkaisulla laskettuja nykyarvoja on tarkasteltu taulukossa 15. Vaikka menetelmien lähtöarvot ovat samat, näkyvät laskutavan erot tuloksissa. Suurin ero näkyy suorassa kumulatiivisten kustannusten laskennassa, jossa 2 % vuosittainen hinnannousu on lisätty sekä sähkönhintaan että huoltokustannuksiin. VALTTI-laskurin sekä nykyarvomenetelmän tulosten välinen ero on melko pieni.

Taulukko 15: Eri menetelmillä laskettujen nykyarvojen [€] vertailua eri ratkaisulla.

laskenta- menetelmä	nykyinen	nykyinen laskennallinen	ratkaisu 1	ratkaisu 2	ratkaisu 3
kaava 4	3 348 839	3 865 836	2 153 595	2 808 618	1 709 571
VALTTI	4 188 070	4 800 210	2 370 955	3 287 749	1 973 523
kumulatiiviset kustannukset	7 265 522	8 660 090	3 619 426	5 210 318	3 211 072

Excelillä suoraan laskettujen kumulatiivisten elinkaarikustannusten kertyminen on esitetty kuvaajassa 35. Kuvaajasta nähdään, että ratkaisu 3 on 30 vuoden aikajänteellä kannattavin ratkaisu. Laskelmien taulukot sekä tarkemmat kuvaajat eri menetelmillä lasketuista elinkaarikustannuksista on esitetty liitteessä H.2.



Kuva 35: Paperisalin valaistuksen eri ratkaisujen elinkaarikustannusten kertyminen 30 vuoden aikana.

Valmistajat lupaavat monimetallilamppujen käyttöajaksi yleensä noin 35 000 tuntia (4 vuotta täysipäiväisellä käytöllä), joten kymmenen vuoden huoltoväli on monimetallilampuille todella pitkä. Tässä ajassa valovirran alenema on hyvin huomattavaa ja myös värimuunnosta alkaa esiintyä, kuten nähtiin kuvasta 3. Lediratkaisujen elinkaarikustannukset on laskettu valmistajien antamia käyttöaikoja noudattaen, joten verrattaessa nykyiseen tilanteeseen, eivät tulokset ole täysin vertailukelpoisia. Tästä syystä nykyisen valaistuksen elinkaarikustannukset laskettiin myös valmistajien antamalla neljän vuoden huoltovälillä. Molempien laskelmien tulokset on nähtävissä liitteen H.2 taulukoissa ja kuvaajissa (nyk. laskennallinen). Tähän laskennalliseen tilanteeseen verrattuna kaikki lediratkaisut ovat vieläkin kannattavampia kuin nykyinen ratkaisu.

### 6.1.3 Takaisinmaksuaika

Luvun 6.1.2 tuloksista lasketut takaisinmaksuajat eri ratkaisuilla ja menetelmillä on esitetty taulukossa 16. Suoran kumulatiivisten kustannusten laskennan takaisinmaksuaika arvioitiin kuvaajista aikana, jolloin uuden ratkaisun kustannukset jäävät nykyisen alapuolelle. Taulukosta nähdään, että verrattuna nykyiseen valaistukseen 10 vuoden huoltovälillä ovat takaisinmaksuajat 2–16 vuotta. Neljän vuoden huoltovälin tilanteeseen verrattuna lediratkaisujen maksuajat ovat vain 2–10 vuotta.

## 6.2 Moottorivarasto

### 6.2.1 Energiankulutuslaskelmat

Taulukossa 9 laskettiin nykyisen valaistuksen sähkönkulutus. Tätä ja luvussa 5 esiteltujen valaisimien energiankulutuslaskelmien tuloksia on vertailtu taulukossa 17.

Taulukko 16: Eri menetelmillä lasketut takaisinmaksuajat (vuosina) eri valaistusratkaisuilla paperisalin kattovalaistukselle.

verrattuna nykyiseen	10v huoltovälillä			4v huoltovälillä		
ratkaisu	1	2	3	1	2	3
kaava 5	9	16	5	7	10	3
VALTTI	6	9	2	4	7	2
kumulatiiviset kustannukset	5	9	2	4	7	2

Taulukko 17: Moottorivaraston valaisinvaihtoehtojen sähkönkulutus (a) isossa ja (b) pienessä tilassa.

(a) ison tilan valaisinten sähkönkulutus

valaisin	6231	Pacific	InduLED	DORA+	RetroFit
määrä [kpl]	57	57	56	57	76
nimellisteho [W]	275	51,5	52	65	58
ottoteho yht. [kW]	15,7	2,9	2,9	3,7	4,4
käyttötunnit [h/vuosi]	8 760	1 460			
sähkönhinta [€/kWh]	0,0438				
energian kustannus [€/vuosi]	6 014	188	186	237	282

(b) pienen tilan valaisinten sähkönkulutus

valaisin	6231	LUMI	CoreLine	PRO 100
määrä [kpl]	13	25	25	25
nimellisteho [W]	275	21	20	15
ottoteho yht. [W]	3 575	525	500	375
käyttötunnit [h/vuosi]	8 760	1 460		
sähkönhinta [€/kWh]	0,0438			
energian kustannus [€/vuosi]	1 372	34	32	24

Varaston nykyinen valaistus on päällä jatkuvasti ja tämä näkyy vahvasti taulukon 17 energiankulutuslaskelmien tuloksissa. Lisäksi nykyinen valaistus on ylimitoitettu ja myös siksi uuden valaistuksen sähkönkulutus on niin pieni nykyiseen verrattuna. Taulukossa 18 on verrattu eri ratkaisujen kulutusta suhteessa valovirtaan, jolloin ratkaisuista saadaan vertailukelpoiset. Taulukosta nähdään, että ledivalai-

sinten suhteellinen energiankulutus on 50–60 % nykyisten monimetallivalaisinten energiankulutuksesta.

Taulukko 18: Moottorivaraston nykyisen ja uusien valaistusratkaisujen energiankulutus suhteessa valovirtaan (a) isossa ja (b) pienessä tilassa.

(a) iso tila		(b) pieni tila	
valaisin	[kWh/Mlmh]	valaisin	[kWh/Mlmh]
6321	19,6	6321	19,6
Pacific (1)	8,2	LUMI (1)	9,6
InduLED (2)	8,2	CoreLine (2)	10,0
DORA+ (3)	7,9	PRO (3)	9,6
RetroFit	9,7		

### 6.2.2 Elinkaarikustannuslaskelmat

Nykyisen valaistuksen laskentaan käytettiin seuraavia olettamia:

- Monimetallilamppujen hinta 70 €/kpl
- Lamppujen vaihtoväli 6 vuotta
- Valaisimien huoltokustannukset 100 €/valaisin (sisältäen osat)

Uusiin valaisimiin käytettiin seuraavia olettamia:

- Uusien valaisimien asennustyön kustannukset 50 €/valaisin
- Valaisimien huolto 15 vuoden jälkeen
- Valaisimien huoltokustannukset 150 €/valaisin (sisältäen osat)
- Ohjausjärjestelmän kustannukset 5 000 € (sisältäen ohjauslaitteiston, anturit, johdotuksen ja asennuksen)

Myös moottorivaraston nykyarvolaskennassa käytettiin yksinkertaistettua kaavaa 4 ja nykyisen valaistuksen investointikustannuksiksi määritettiin alun huoltokustannukset. Taulukossa 19 on esitetty eri menetelmillä saadut nykyarvot eri ratkaisuille. Laskelmien tarkemmat taulukot ja tulosten kuvaajat on esitetty liitteessä H.3.

Taulukosta 19 nähdään, että nykyiseen tilanteeseen verrattuna kaikkien ratkaisujen nykyarvot jäävät alle neljäsosaan. Tästä kuitenkin suurin osa johtuu ohjauksen tuomasta energiansäästöstä. Vertailun vuoksi laskelmissa arvioitiin myös nykyistä monimetallivalaistusta ohjauksen kanssa ja tulokset on sisällytetty liitteen H.3 kuvaajiin ja taulukoihin. VALTTI-laskurin mukaan tämä ratkaisu jäisi halvimmaksi 30 vuoden aikavälillä. Monimetallilamppujen käyttö läsnäolo-ohjauksessa ei kuitenkaan ole käytännöllistä lamppujen pitkän syttymisajan vuoksi. Lediratkaisujen nykyarvot ovat suhteellisen samansuuruiset kaikilla laskutavoilla, kuten nähdään taulukosta

19. Arvoissa esiintyy jonkin verran systemaattista eroa eri menetelmien välillä, mikä johtunee menetelmien korkojen laskutavoista.

Taulukko 19: Eri menetelmillä saadut nykyarvot [€] eri ratkaisuille (a) isossa ja (b) pienessä tilassa.

(a) iso tila			
ratkaisu	kaava 4	VALTTI	kumulatiiviset kustannukset
nykyinen	126 566	158 672	225 052
nyk. ohjauksella	34 429	38 165	58 775
1	34 818	34 844	38 892
2	29 749	30 100	34 114
3	34 073	34 341	39 407
RetroFit	43 296	44 812	49 685

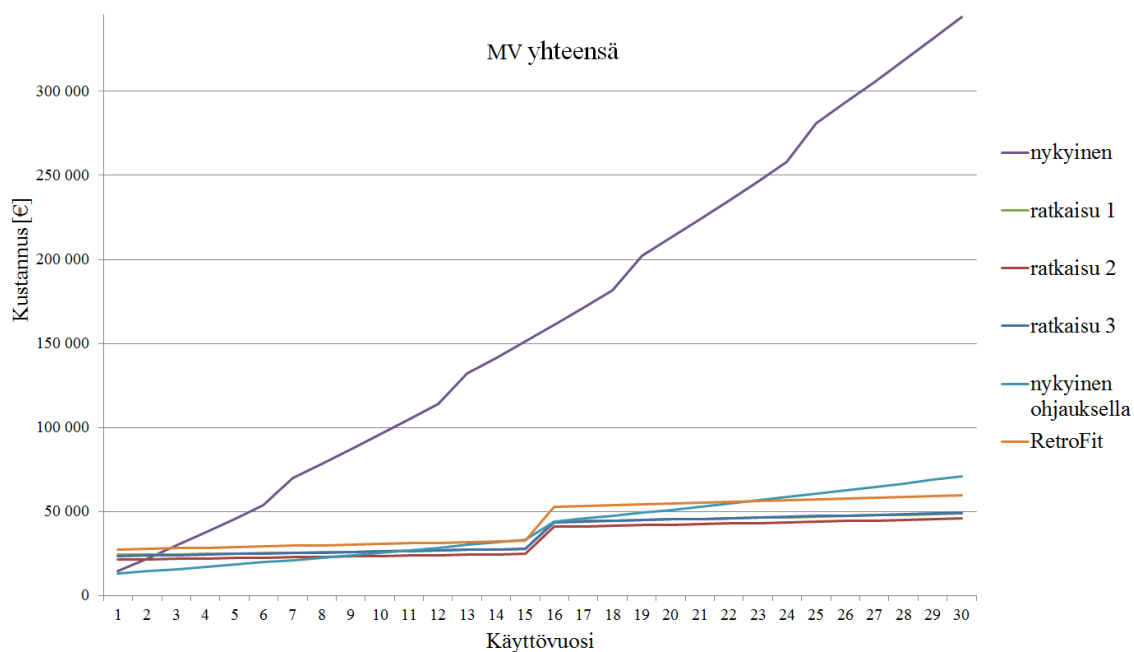
  

(b) pieni tila			
ratkaisu	kaava 4	VALTTI	kumulatiiviset kustannukset
nykyinen	28 866	36 188	51 328
nyk. ohjauksella	6 852	7 514	12 264
1	8 943	9 219	9 987
2	10 746	10 832	11 622
3	9 720	9 862	10 023

Kuvassa 36 on esitetty Excelillä suoraan laskettujen kumulatiivisten elinkaarikustannusten kertyminen 30 vuoden aikana. Kuvaajasta nähdään, että kaikki lediratkaisut ovat huomattavan paljon halvempia heti 2–4 vuoden jälkeen verrattuna nykyiseen täysipäiväiseen monimetallivalaistukseen. Myös nykyiseen valaistukseen ohjauksella verrattuna lediratkaisut maksavat itsensä takaisin viimeistään 20 vuoden aikana. Kuvaajasta nähdään myös, ettei RetroFit-ratkaisu ole tässä tapauksessa kovin kannattava, kun verrataan muihin lediratkaisuihin.

### 6.2.3 Takaisinmaksuaika

Moottorivaraston uuden valaistuksen takaisinmaksuaika arvioitiin kaavalla 5, VALTTI-laskurilla sekä suoran kumulatiivisten kustannusten laskennan tuloskuvaajista. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 20. Taulukossa on vertailtu lediratkaisuja sekä nykyiseen täysipäiväiseen että ohjauksella paranneltuun valaistukseen. Taulukosta nähdään, että lediratkaisujen takaisinmaksuaika verrattuna nykyiseen valaistukseen on hyvin matala: 1–6 vuotta riippuen laskentatavasta.



Kuva 36: Moottorivaraston valaisinten eri ratkaisujen elinkaarikustannusten kertyminen 30 vuoden aikana.

Taulukko 20: Eri menetelmillä lasketut takaisinmaksuajat (vuosina) eri valaistusratkaisuille moottorivaraston (a) ison ja (b) pienen tilan valaisimille.

(a) iso tila

verrattuna nykyiseen	ilman ohjausta				ohjauksella			
ratkaisu	1	2	3	RetroFit	1	2	3	RetroFit
kaava 4	4	3	3	4	-	-	-	-
VALTTI	2	1	2	3	19	7	17	-
kumulatiiviset kustannukset	2	2	2	3	10	6	10	22

(b) pieni tila

	verrattuna nykyiseen		
ratkaisu	1	2	3
kaava 4	3	5	4
VALTTI	1	3	2
kumulatiiviset kustannukset	2	3	2

## 7 Johtopäätökset

Luvun 6 tuloksista nähtiin lediratkaisujen ja niiden ohjauksen mahdollistavan suuria säästöjä energiankulutuksessa (jopa 80 %) sekä pidentävän valaistuksen vaatimaa huoltoväliä usealla vuodella. Järkevästi suunnitellulla ohjauksella molempia etuja pystytään vieläkin tehokkaammin hyödyntämään. Tarkalla käyttöprofiilin kartoittamisella ja sen myötä ohjauksen suunnittelulla voidaan valaistuksen uusimisen tuomia säästöjä kasvattaa vielä huomattavasti.

Sekä mittausten että mallinnusten perusteella voidaan sanoa, ettei päivänvalon hyöty valaistuksessa ole merkittävä. Molempien tutkittujen tilojen ikkunapinta-ala on hyvin pieni verrattuna tilan kokonaisalaan, joten päivänvalo-ohjauksesta saatava hyöty jäisi hyvin pieneksi. Tarkemmassa ohjauksen suunnittelussa myös tämä vaihtoehto kannattaisi kuitenkin ottaa huomioon.

Toinen lisätutkintaa vaativa tekijä on valon värilämpötila. Yleisesti korkeampi värilämpötila tarkoittaa suurempaa valovirtaa, jolloin valaisimia tarvitaan vähemmän saman valaistusvoimakkuuden saavuttamiseksi. Toisaalta värilämpötilan nostaminen laskee värintoistoindeksiä. Joissakin tiloissa liian kylmän värinen valo voi tuntua käyttäjistä ikävältä ja värilämpötila kannattaakin miettiä aina kohteen mukaan.

Eri menetelmillä saaduissa tuloksissa esiintyi melko paljon eroja. VALTTI-elinkaarikustannuslaskuri käyttää myös nykyarvomenetelmää laskennoissaan, joten on järkevää, että samaa menetelmää käyttävien laskelmien tulokset ovat lähellä toisiaan. VALTTI-laskuri ottaa yleisen laskentakoron lisäksi huomioon energian, valonlähteiden ja huoltokustannusten vuotuisen hinnannousun ja tämä osaltaan muuttaa tuloksia. Suorassa kumulatiivisten kustannusten laskennassa on otettu huomioon energian ja huoltokustannusten hinnannousu, muttei yleistä laskentakorkoa. Tällä menetelmällä saadut tulokset ovat selkeästi suurempia, kuin kahdella muulla menetelmällä, mutta suhteelliset erot nykyisen ja eri uusien ratkaisujen välillä ovat samanlaisia.

Vaikka eri menetelmillä saaduissa nykyarvoissa onkin eroa, näyttävät kaikki menetelmät kustannustehokkaimmiksi vaihtoehtoiksi paperisaliin kattoon Easy LEDin PRO ja hylsyvaraston alle Fagerhultin InduLED -valaisimia. Moottorivarastoon kannattavimmaksi ratkaisuksi laskelmien mukaan tulisi I-Valon LEDA sekä LUMI-valaisimet läsnäolo-ohjauksella.

Yleensä elinkaarikustannuksia laskettaessa käytetään vain yhtä menetelmää. Tässä työssä käytettiin kolmea eri menetelmää ja näillä saatuja tuloksia vertaillen voidaan todeta tulokset melko luotettaviksi. Tulosten perusteella voidaan sanoa teollisuusvalaistuksen saneerauksen ledivalaisimilla olevan tällä hetkellä kokonaistaloudellisesti kannattavaa.

Kuten luvussa 2.1.6 todettiin, ovat ledien hinnat koko ajan laskussa ja toisaalta niiden valotehokkuus kasvaa. Lisäksi markkinoille tuodaan jatkuvasti uusia valaisimalleja – erityisesti suuritehoisia ratkaisuja teollisuuteen ja ulkovalaistukseen. Samalla, kun ledien käyttö yleistyy, muiden valonlähteiden kysyntä laskee ja tämä saattaa näkyä näiden hintojen nousuna. Tulevaisuudessa siis ledien käyttö tulee olemaan vielä nykyistä kannattavampaa.



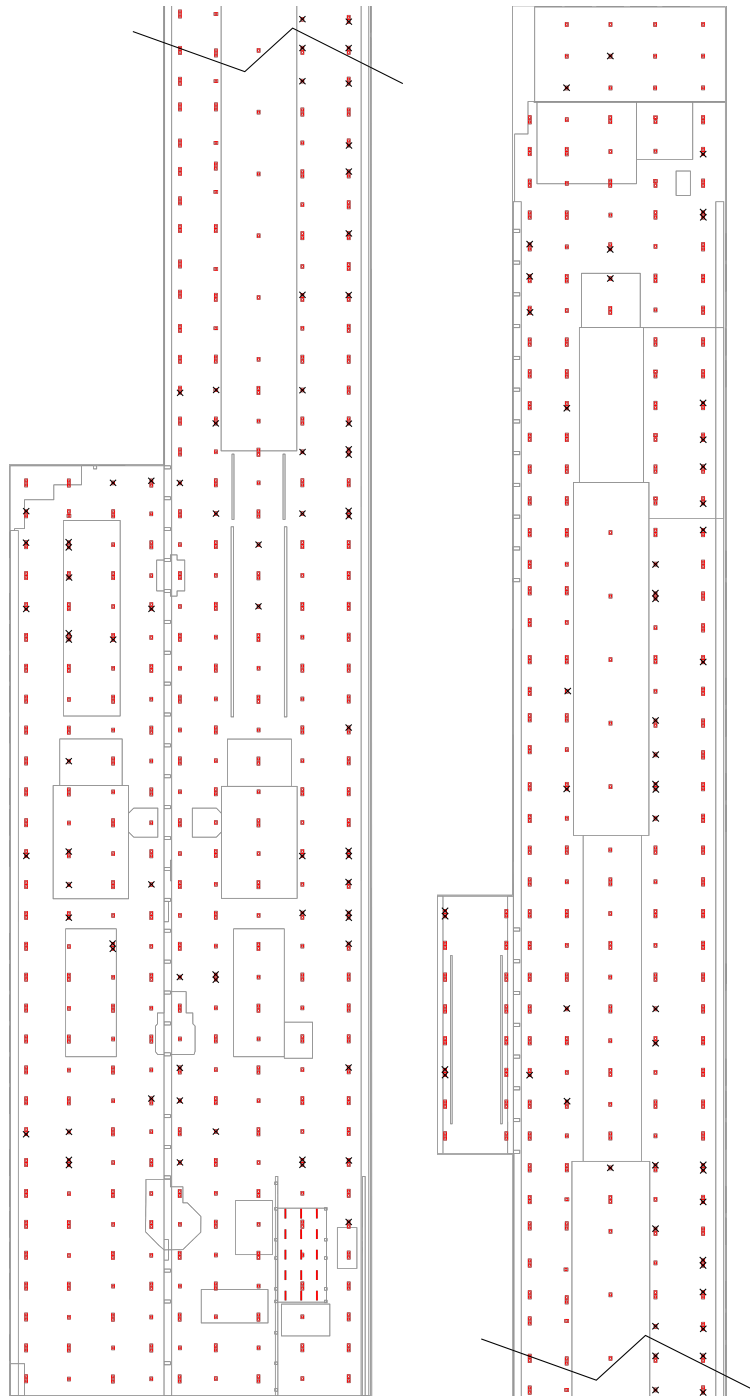
## Viitteet

- [1] Euroopan yhteisöjen komissio. Komission asetus (EY) N:o 245/2009. Euroopan unionin virallinen lehti, vol. L 76/17, 2009.
- [2] Motiva Oy. VALTTI-elinkaarikustannuslaskuri. (online), 2016. Viitattu: 13.7.2016, Saatavissa: <http://valaistustieto.fi/laskuri/>.
- [3] DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R. ja Steffy, G. (toim.) *The Lighting Handbook: Reference and Application*. 10 painos. Illuminating Engineering Society of North America, 2011.
- [4] Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki. *SFS-EN 12464-1. Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus.*, 2011.
- [5] Solid-State Lighting: R&D Plan. (online), U.S. Department of Energy, 2015. Viitattu 23.2.2016, Saatavissa: [http://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f22/ssl\\_rd-plan\\_may2015\\_0.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f22/ssl_rd-plan_may2015_0.pdf).
- [6] Halonen, L. ja Lehtovaara, J. *Valaistustekniikka*. Otatieto, 1992.
- [7] Simpson, R. S. *Lighting control - technology and Applications*. Focal Press, 2003.
- [8] Halonen, L., Tetri, E. ja Bhusal, P. *Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings*. Aalto University School of Science and Technology, 2010.
- [9] Pietilä, K. 2016. Tuoteasiantuntija. Ledvance Oy. Sähköpostikeskustelu 8.-15.9.2016.
- [10] Alanko, L. LED-valaistuksen suunnittelu LEKOhalliin. Insinööritö, 2014.
- [11] Fagerhult Oy. Declaring the life time of LED-luminaires, 2015. Viitattu 1.3.2016, Saatavissa: [http://www.fagerhult.com/Global/Downloads/Technical\\_info/Life\\_time\\_LEDs\\_download.pdf](http://www.fagerhult.com/Global/Downloads/Technical_info/Life_time_LEDs_download.pdf).
- [12] Commission, I. E. IEC/PAS 62717 LED modules for genaral lighting - Performance requirements, 2014.
- [13] Ledvance. Led-perusteet, 2016. Viitattu 14.9.2016, Saatavissa: [http://www.ledvance.fi/ldv\\_fi/uutiset--tiedot/led/ammattitietoa/led-perusteet/index.jsp](http://www.ledvance.fi/ldv_fi/uutiset--tiedot/led/ammattitietoa/led-perusteet/index.jsp).
- [14] Vaara, K. Teollisuuslaitoksen valaistuksen kehittäminen. Insinööritö, 2015.
- [15] Kari, S. Valaistuksen ohjausjärjestelmät. Insinööritö, 2012.
- [16] Technical overview. (online), DALI ag, 2016. Viitattu 1.3.2016, Saatavissa: <http://www.dali-ag.org/discover-dali/technical-overview.html>.

- [17] KNX Basics. Verkkojulkaisu (online), 2015. Viitattu 7.3.2016, Saatavissa: [http://knx.org/media/docs/downloads/Marketing/Flyers/KNX-Basics/KNX-Basics\\_en.pdf](http://knx.org/media/docs/downloads/Marketing/Flyers/KNX-Basics/KNX-Basics_en.pdf).
- [18] C2 Smartlight Oy. Kuvasto (online), 2015. Viitattu 1.3.2016, Saatavissa: [http://c2smartlight.com/wp-content/uploads/2016/08/Kuvasto-2015\\_small.pdf](http://c2smartlight.com/wp-content/uploads/2016/08/Kuvasto-2015_small.pdf).
- [19] Philips lighting. Verkkosivusto (online), 2016. Viitattu 7.3.2016, Saatavissa: <http://www.lighting.philips.fi/ratkaisut/valaistuspaketit/toimistot-ja-teollisuus/ymparistoystavallinen-varastovalistus.html>.
- [20] Tähkämö, L. Life-cycle assessment, life cycle costing, European legislation. Luentokalvot, 2016.
- [21] Motiva Oy. *VALTTI- elinkaarikustannuslaskurin käyttöohje*, 2016. Saatavissa: <http://valaistustieto.fi/wp-content/uploads/Valaistuslaskenta-k%C3%A4ytt%C3%B6ohje-7-6-2016.pdf>.
- [22] Koski, M. 2016. Kunnossapitoinsinööri. Sappi Ltd. Haastattelut ja sähköpostikeskustelu 3.3.–15.8.2016.
- [23] Ahponen, V., Kasurinen, E. ja Timonen, T. *Valaistuksen laskenta, mittaukset ja huolto*. Suomen valoteknillinen seura ry, Espoo, 1996.
- [24] I-Valo Oy. Teollisuusvalaisimet -luettelo, 2000.
- [25] Philips lighting. Verkkosivusto (online), 2016. Viitattu 7.3.2016, Saatavissa: <http://www.lighting.philips.fi/prof/sisaevalaisimet>.
- [26] I-Valo Oy. LED teollisuusvalaisimet. Verkkosivu (online), 2016. Saatavissa: <http://www.i-valo.com/verkkokauppa/fin/client/index/151>.
- [27] Easy LED Oy. PRO series -yleisesite. Verkkodokumentti (online), 2015. Viitattu 27.7.2016, Saatavissa: [http://easyled.fi/sites/default/files/pro\\_series\\_fi\\_0.pdf](http://easyled.fi/sites/default/files/pro_series_fi_0.pdf).

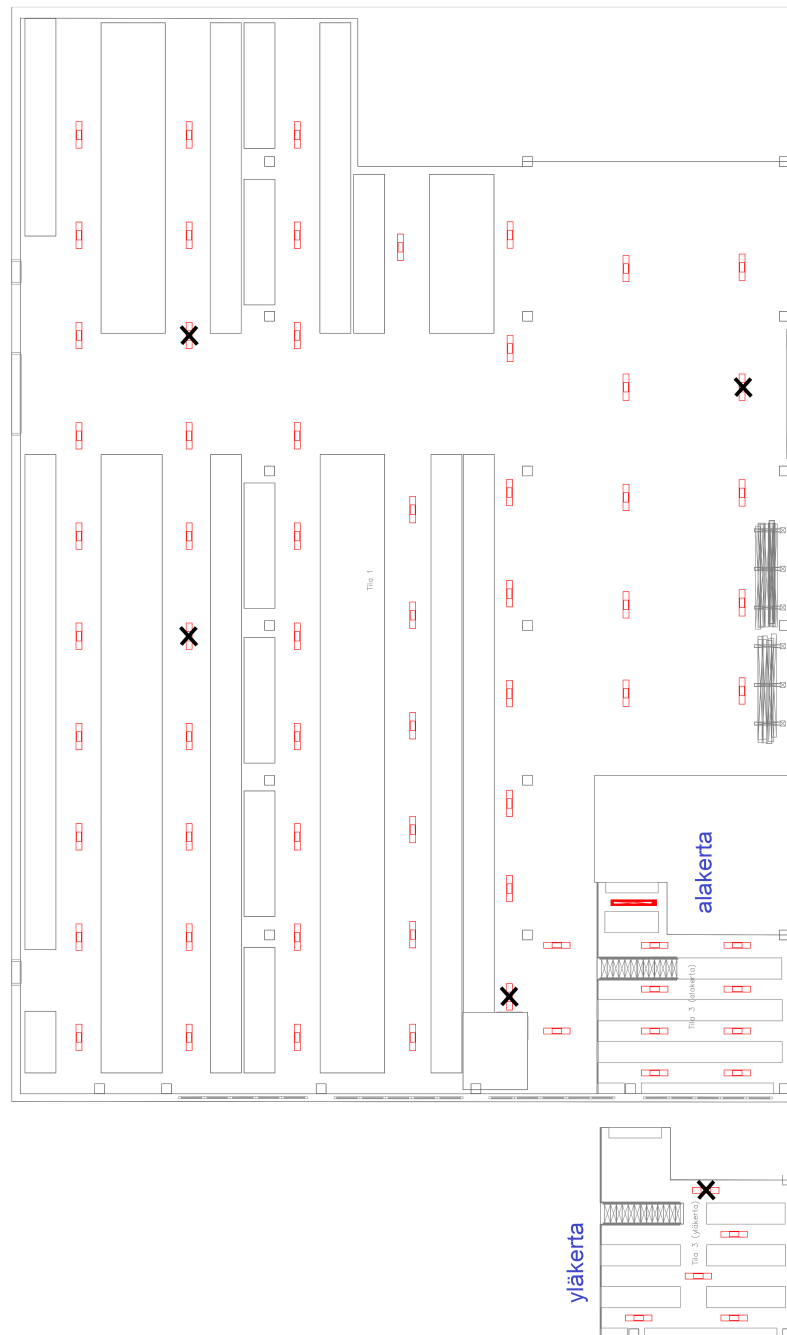
## A Pohjapiirustukset ja valaisinten paikat

### A.1 PK3 paperisali



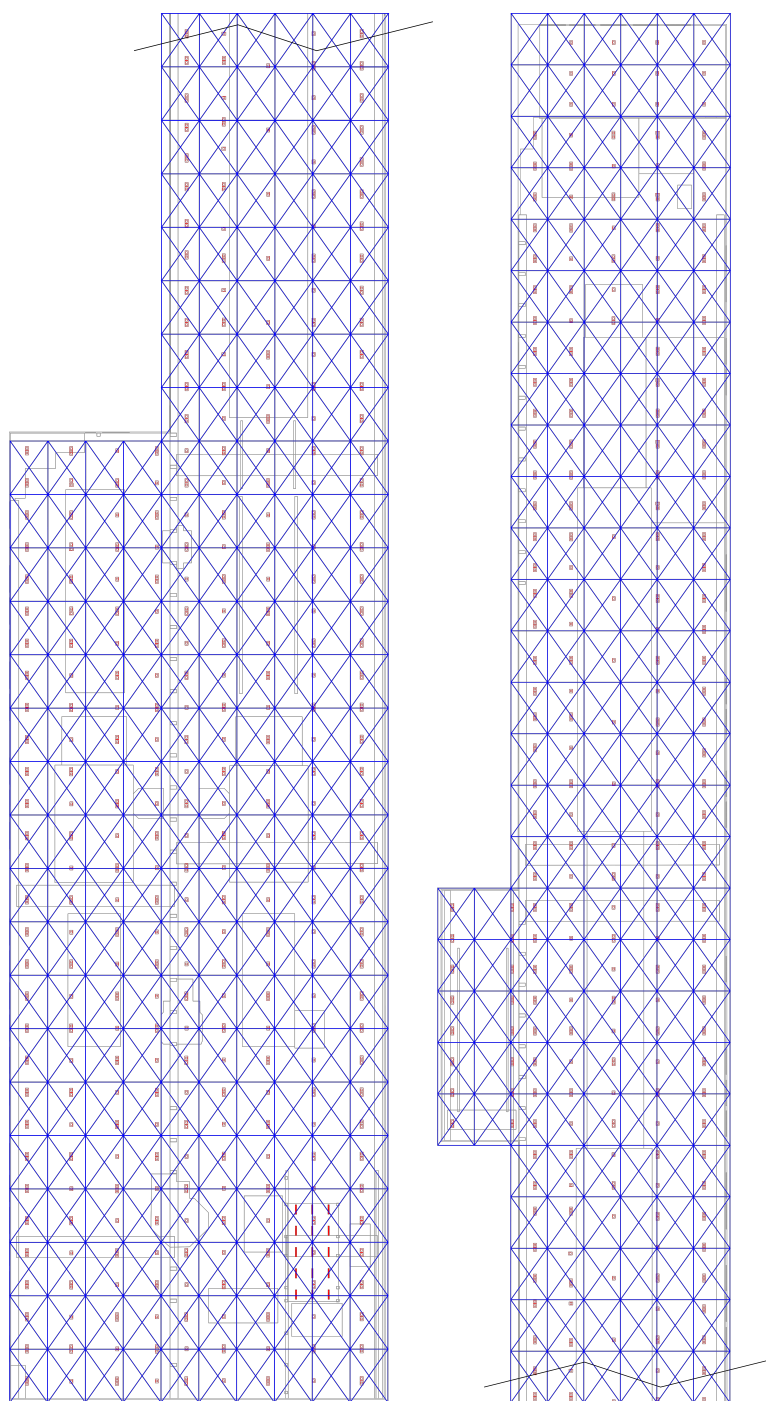
Kuva A1: PK3 paperisalin pohjapiirustus. Rikkinäiset lamput on merkitty kuvaan ruksilla kyseisen valaisimen päälle.

## A.2 Moottorivarasto

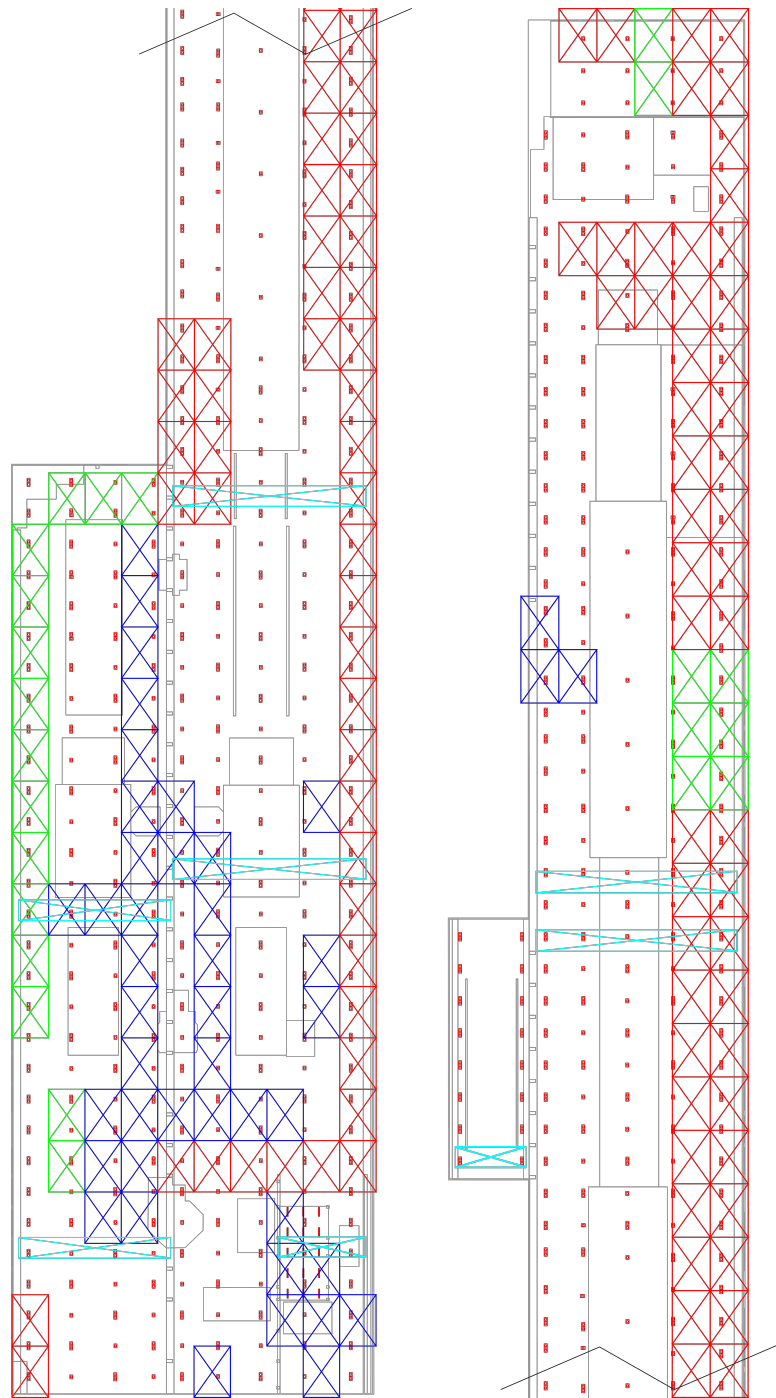


Kuva A2: Moottorivaraston pohjapiirustus. Rikkinäiset lamput on merkitty kuvaan ruksilla kyseisen valaisimen päälle.

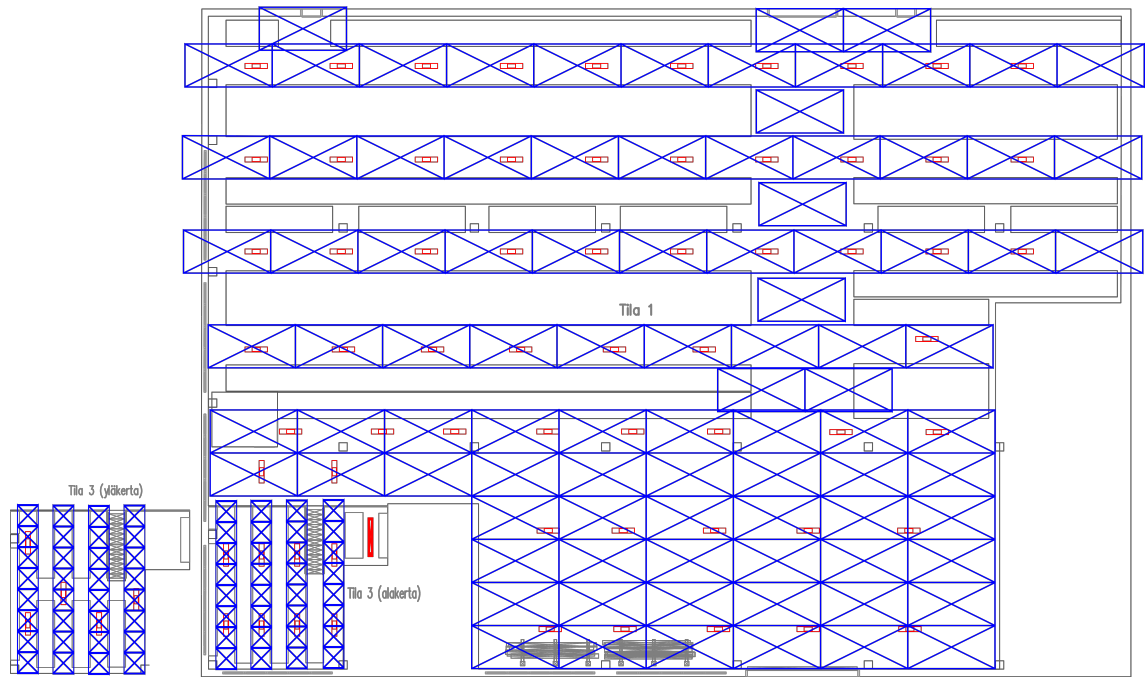
## B Valaistusvoimakkuusmittausten mittauspisteet



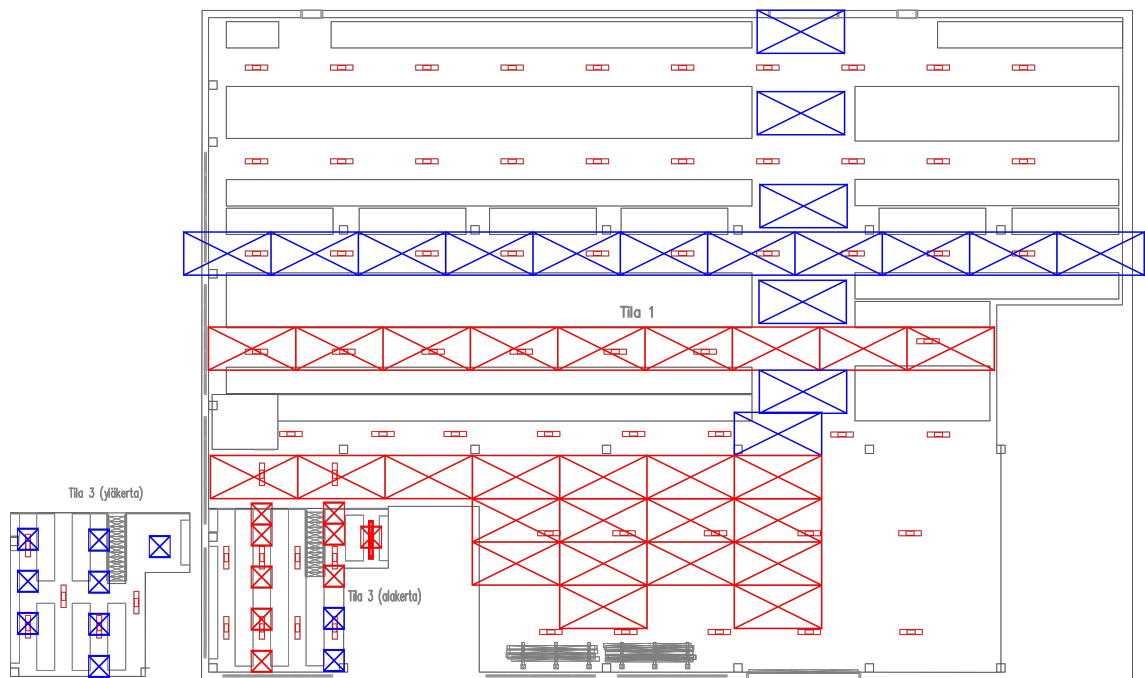
Kuva B1: Valaistusvoimakkuusmittausten suunnitellut mittauspisteet paperisalissa. Mittaukset suoritetaan jokaisen sinisen ruudun keskellä lävistäjien leikkauspisteessä.



Kuva B2: Valaistusvoimakkuusmittausten toteutuneet mittauspisteet paperisalis-  
sa. Mittaukset suoritettiin ruudun keskellä lävistäjien leikkauspisteessä. Punainen  
tarkoittaa päivällä, tummansininen yöllä ja vihreä molempina mitattua pistettä.  
Vaaleansinisellä on merkitty siltanosturien paikat mittaushetkillä.



Kuva B3: Valaistusvoimakkuusmittausten suunnitellut mittauspisteet varastotilassa. Mittaukset suoritetaan jokaisen sinisen ruudun keskellä lävistäjien leikkauspisteessä.



Kuva B4: Valaistusvoimakkuusmittausten toteutuneet mittauspisteet varastotilassa. Mittaukset suoritettiin ruudun keskellä lävistäjien leikkauspisteessä. Sininen tarkoittaa yöllä ja punainen päivällä mitattua pistettä.

# C Valaistusvoimakkuusmittausten mittaustulokset

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
lux	337,5	4428						6166	453,7	387,4	3188	478,1	408,9	449,8	374,1	290,7	284,2	
K	5019	4406						4546	4643	4983	4658	5095	5044	5089	5229	5235	5191	
Ra	83	96						97	94	86	97	90	87	88	86	84	83	
huomiota		auringossa 18:41						18:23 auringossa			auringonpaisteissa							
lux				400,8	329	491,2											282,4	
K				5028	4951	4945											5159	
Ra				85	85	85											83	
huomiota																		
lux																	301,3	
K																	5278	
Ra																	85	
huomiota																		
lux																	270,1	
K																	5139	
Ra																	84	
huomiota																		
lux					302,3												259,9	
K					4920												5079	
Ra					90												83	
huomiota																		
lux					452												255,4	
K					4709												5100	
Ra					95												83	
huomiota																	nosturi päällä	
lux					475,9													
K					4680													
Ra					95													
huomiota																		
lux					371,2													
K					4645													
Ra					95													
huomiota																		
lux					323,2													
K					4615													
Ra					95													
huomiota																		
lux					340,7	418	406,8	397,2	306,6	232,1	119,6	361	359,5	373,8	430,2	424,2	268,6	250,4
K					4597	4624	4619	4572	4605	4632	4573	4623	4576	4777	4655	4787	4658	4738
Ra					95	95	95	96	96	95	95	95	96	94	95	94	94	94
huomiota											nosturi kondalla	nosturi vieressä	nosturi vieressä				nosturi kondalla	

Kuva C1: Valaistusvoimakkuusmittausten mittauspöytäkirja osa 1.



		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
lux	A																		
K																			
Ra																			
huomioita																			
lux	B																		
K																			
Ra																			
huomioita																			
lux	C																		
K																			
Ra																			
huomioita																			
lux	D																		
K																			
Ra																			
huomioita																			
lux	E	644,3	11310	291,5															
K		5764	4653	5109															
Ra		93	97	83															
huomioita		18:02	auringonpaisteissa																
lux	F	338,4	327,4	307,8															
K		5108	4943	5082															
Ra		83	86	83															
huomioita																			
lux	G																		
K																			
Ra																			
huomioita																			
lux	H																		
K																			
Ra																			
huomioita																			
lux	I			310,2	270,1	289,8	267	267	201,5	186,5	219,6	243,1	270,6	368,7	382,6	348	351,4	361,7	365,2
K			4722	4658	4624	4659	4646	4639	4639	4669	4676	4750	4743	4681	4674	4639	4625	4678	4613
Ra			95	95	95	96	96	96	96	96	96	94	93	94	94	95	95	95	95
huomioita																	nosturi vieressä	nosturi kohdalla	
lux	J	186,1	285	301,5	218	267,1	253,9	252,2	231	276,5	268,5	370,2	260,7	449,2	387,5	466,6	423,8	362,6	315
K		4705	4645	4720	4705	4666	4701	4695	4678	5393	5258	5119	4961	4777	4692	4843	4710	4634	4660
Ra		94	95	95	95	95	95	95	95	97	96	96	95	96	95	96	96	95	95
huomioita		nosturi vieressä		nosturi vieressä													nosturi vieressä	nosturi kohdalla	

Kuva C2: Valaistusvoimakkuusmittausten mittauspöytäkirja osa 2.

		37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
lux	A																
K																	
Ra																	
huomioita																	
lux	B																
K																	
Ra																	
huomioita																	
lux	C																
K																	
Ra																	
huomioita																	
lux	D																
K																	
Ra																	
huomioita																	
lux	E																
K																	
Ra																	
huomioita																	
lux	F												391,7				201,9
K													4605				5291
Ra													92				82
huomioita																	2,2m ikkunasta
lux	G											303,9	327,1				259,9
K												4775	4805				6232
Ra												92	92				89
huomioita																	2,2m ikkunasta
lux	H											310,2	315,4			195,7	211,8
K												4785	4795			5296	5442
Ra												92	91			81	86
huomioita																	3,8m ikkunasta
lux	I	289,7	256,2	301,1	280,4	223,4	225,6	239,8	222,8	249,3	301,1	334,2	315,7			216,8	238,3
K		4664	4823	4956	4939	4998	4960	4866	4878	4940	4900	4906	4918			5292	5709
Ra		95	89	86	86	87	90	92	91	90	90	90	90			81	88
huomioita																	
lux	J	433,3	329,8	380	274	334,8	229,4	189,8	198,3	277,6	296,6	353,1	280			186,4	142
K		4875	4902	5241	4992	5868	5067	4919	5001	5583	5069	5341	5225			5129	5028
Ra		96	89	88	85	89	87	89	87	89	88	89	89			82	82
huomioita																	

Kuva C3: Valaistusvoimakkuusmittausten mittauspöytäkirja osa 3.



## E Luminanssimittausten mittaustulokset ja laskelmat

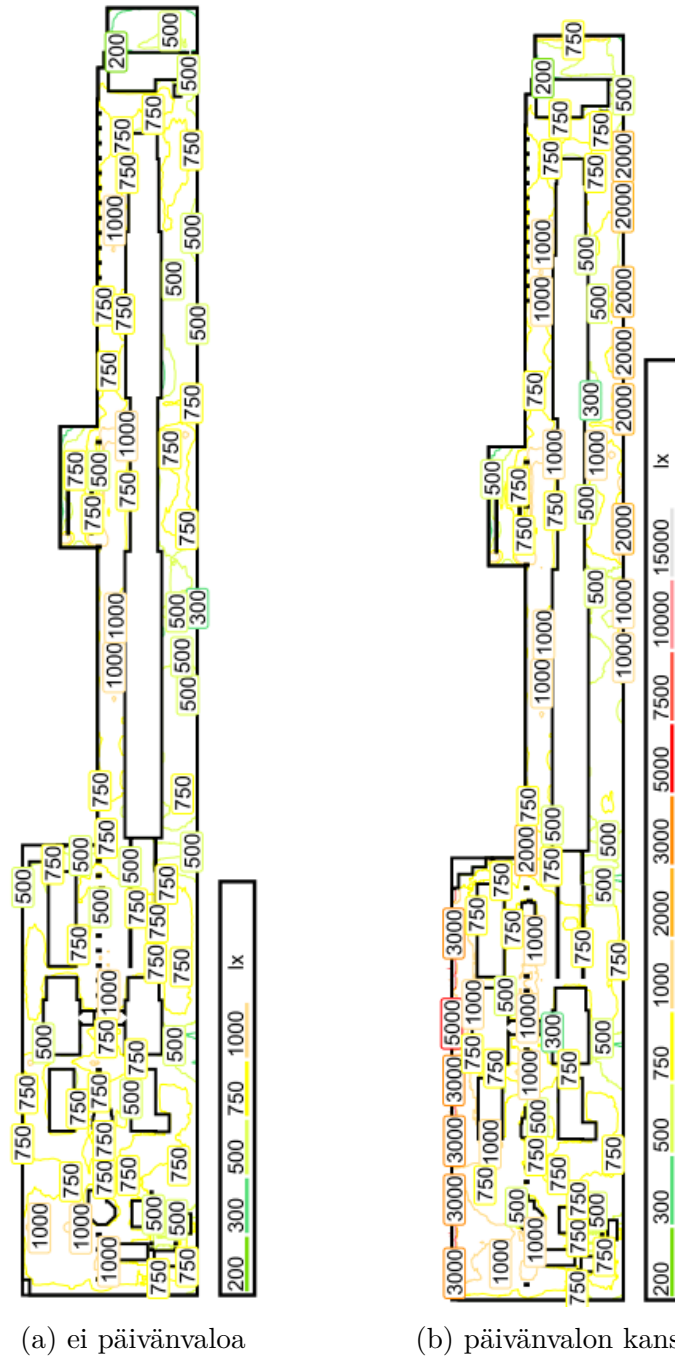
PK3: häikäisyä tuntui ainoastaan ikkunan lähellä auringon paistaessa illalla suoraan sisään. Valaisimista ei tuntunut olevan haittaa.  
MV: lamput tuntuu kirkkailta, kun katsoo yhtään yläviistoon

Kuva PK3-katto		mol. lamput					
kuvaajasta	L_B [lm]	13,7					
	L [lm]	6169					
	X [m]	0					
	Y [m]	8,7					
	H [m]	13,8					
	r [m]	18,6					
	p	14					
	A [m <sup>2</sup> ]	0,20992829					
	$\omega = A/r^2$	0,000606799					
	UGR	25,37995099					
Kuva PK-ikkuna		ikkuna	lattia	etäisyydet arvioituja			
kuvaajasta	L_B [lm]	3712					
	L [lm]	1239		9776			
	X [m]	0		0			
	Y [m]	10		3			
	H [m]	0		1,5			
	r [m]	10		3			
	p	1		3			
	A [m <sup>2</sup> ]	10		8			
	$\omega = A/r^2$	0,1		0,888888889			
	UGR	22,48212594					
Kuva MV-luminanssit		lamppu 1	lamppu 2	lamppu 3	lamppu 4	lamppu 5	lamppu 6
kuvaajasta	L_B [lm]	13,425					
	L [lm]	1209		1762	3304	4617	2110
	X [m]	0		0	0	0	0
	Y [m]	21,19646197	17,12571166	12,80351514	8,248636251	22,4127196	14,76753
	H [m]	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	r [m]	21,5	17,5	13,3	9	22,7	15,2
	p	1,4	1,6	1,8	3	1,4	1,7
	A [m <sup>2</sup> ]	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
	$\omega = A/r^2$	7,78799E-05	0,000117551	0,000203516	0,000444444	6,98636E-05	0,000156
	UGR	14,48183183					
Kuva MV-hylly		lamppu 1	lamppu 2	lamppu 3			
kuvaajasta	L_B [lm]	56,5875					
	L [lm]	3366		4987	2389		
	X [m]	0		0	0		
	Y [m]	3,174901573	3,324154028	7,7			
	H [m]	3,6	3,6	3,6			
	r [m]	4,8	4,9	8,5			
	p	8,5	8	3			
	A [m <sup>2</sup> ]	0,036	0,036	0,036			
	$\omega = A/r^2$	0,0015625	0,001499375	0,00049827			
	UGR	5,628110391					

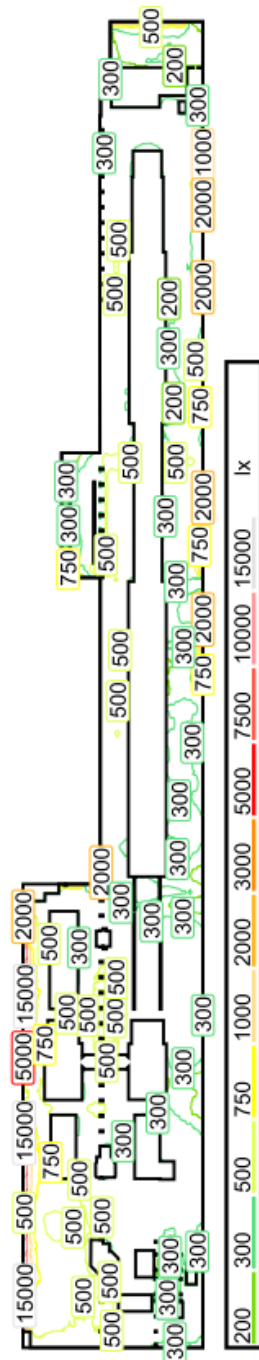
Kuva E1: Mitatut luminanssiarvot ja niistä lasketut häikäisyindeksit.

## F Vanhan asennuksen DIALux-malli ja tulokset

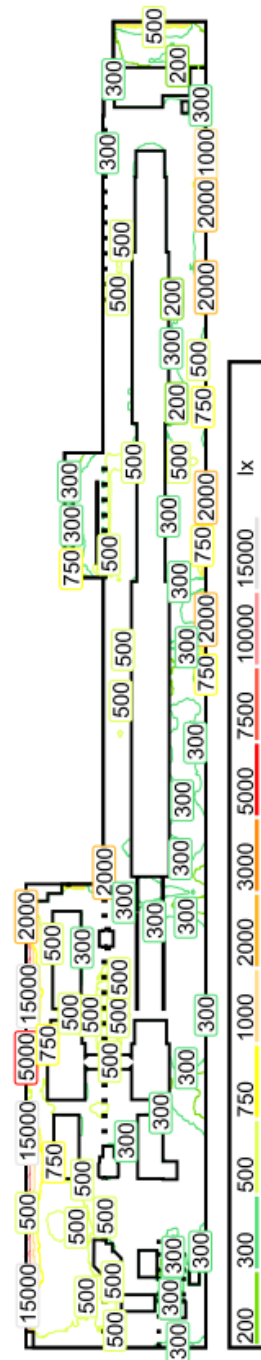
### F.1 DIALux-mallinnuksen tulokset paperisalisissa



Kuva F1: Paperisalin laskelman tulokset 100 % valaistustasolla (a) ilman päivänvaloa ja (b) sen kanssa.



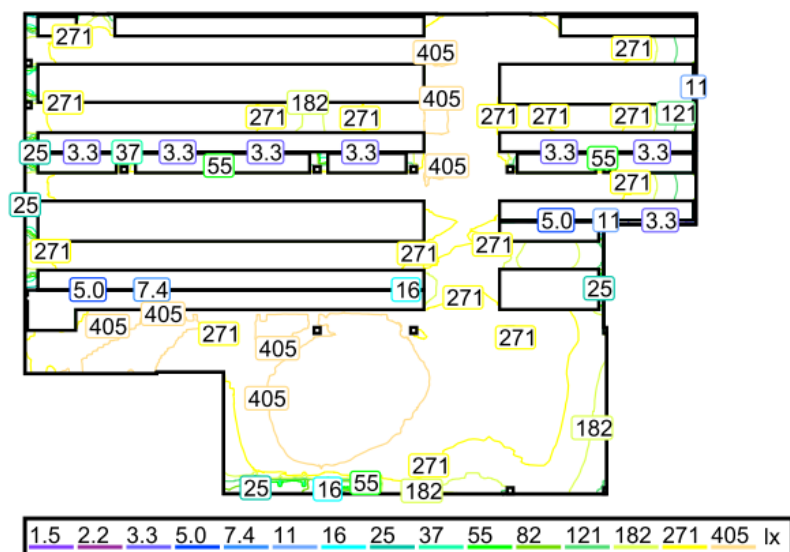
(a) ei päivänvaloa



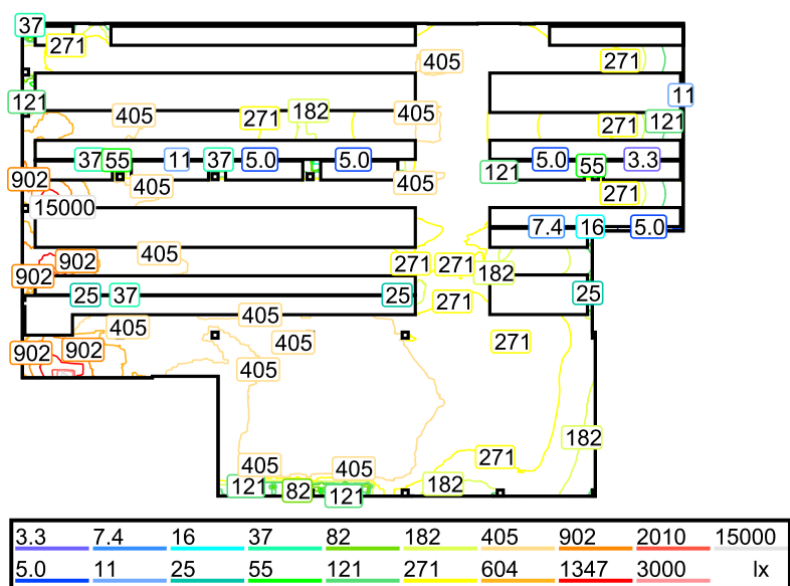
(b) päivänvalon kanssa

Kuva F2: Paperisalin laskelman tulokset 50 % valaistustasolla (a) ilman päivänvaloa ja (b) sen kanssa.

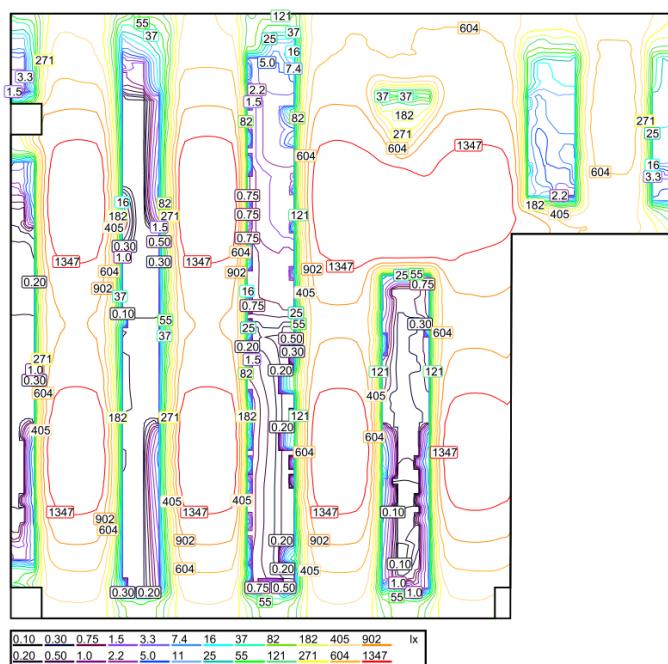
## F.2 DIALux-mallinnuksen tulokset moottorivarastossa



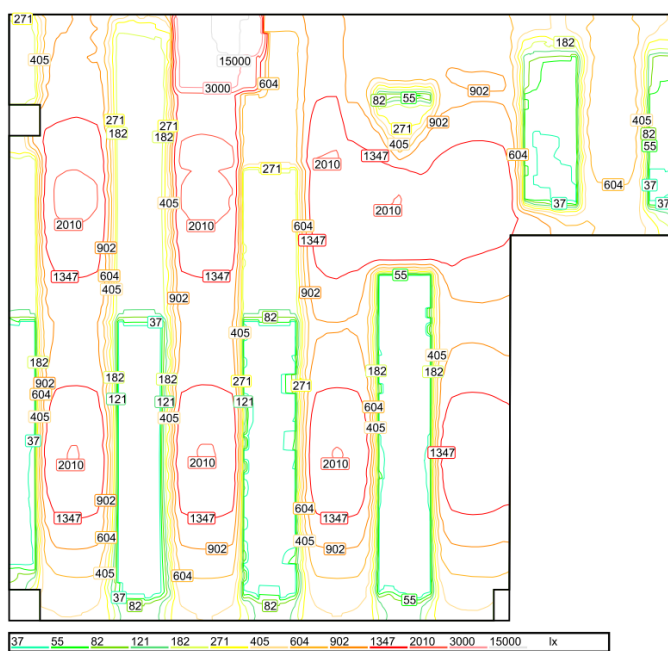
Kuva F3: Moottorivaraston ison tilan laskelman tulokset käyttötasolla isolux-käyrin ilman päivänvaloa laskettuna.



Kuva F4: Moottorivaraston ison tilan laskelman tulokset käyttötasolla isolux-käyrin päivänvalon kanssa laskettuna.

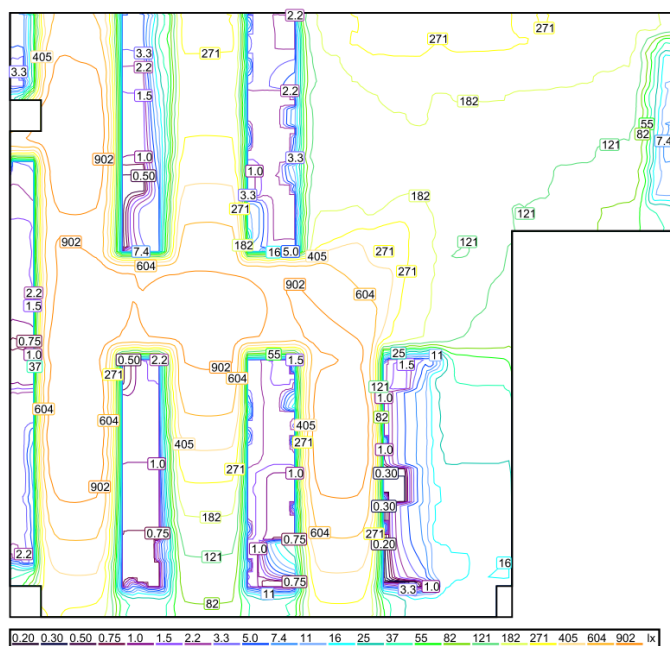


Kuva F5: Moottorivaraston pienen tilan alakerran laskelman tulokset käyttötasolla ilman päivänvaloa.

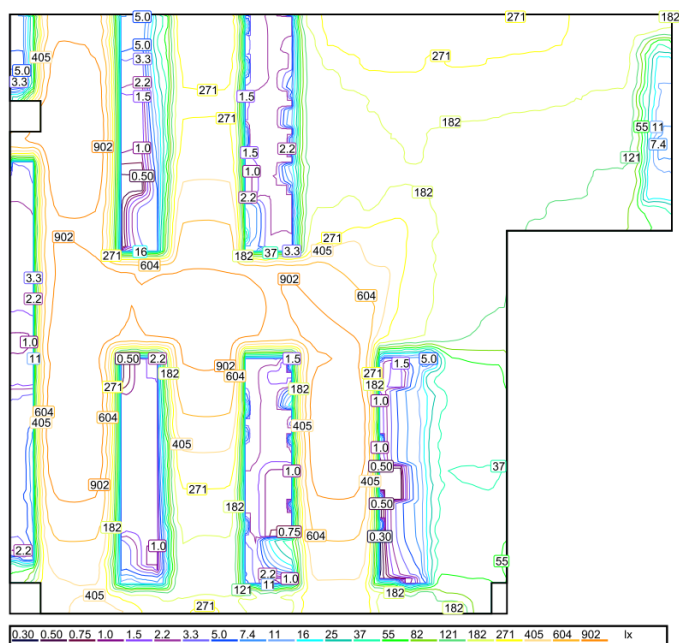


Kuva F6: Moottorivaraston pienen tilan alakerran laskelman tulokset käyttötasolla päivänvalo huomioon ottaen.





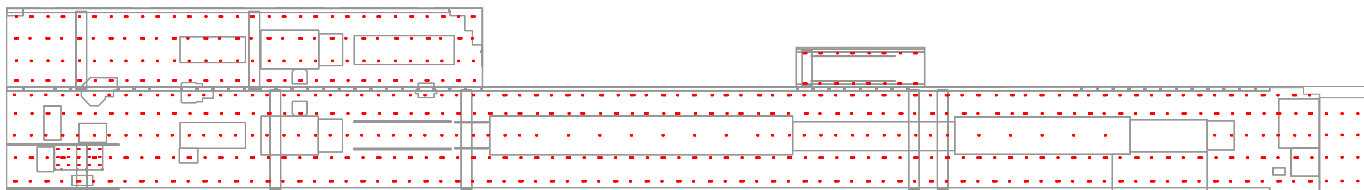
Kuva F7: Moottorivaraston pienen tilan yläkerran laskelman tulokset käyttötasolla ilman päivänvaloa.



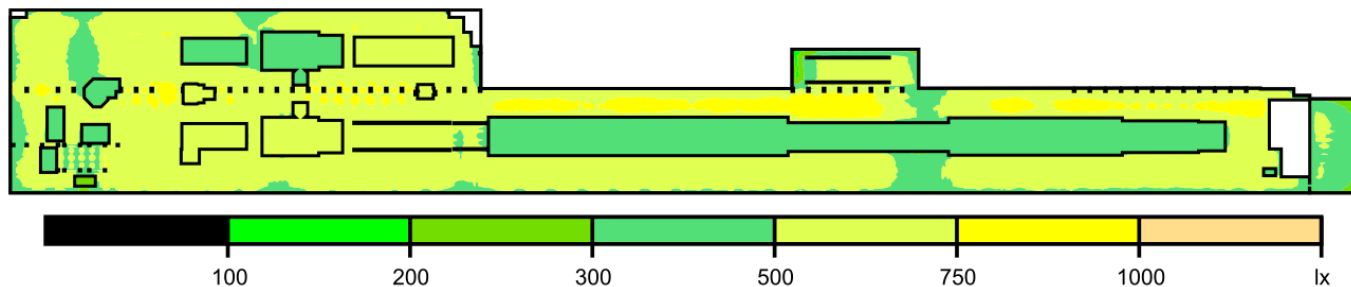
Kuva F8: Moottorivaraston pienen tilan yläkerran laskelman tulokset käyttötasolla päivänvalo huomioon ottaen.

## G Uusien valaistussuunnitelmien DIALux-mallit ja tulokset

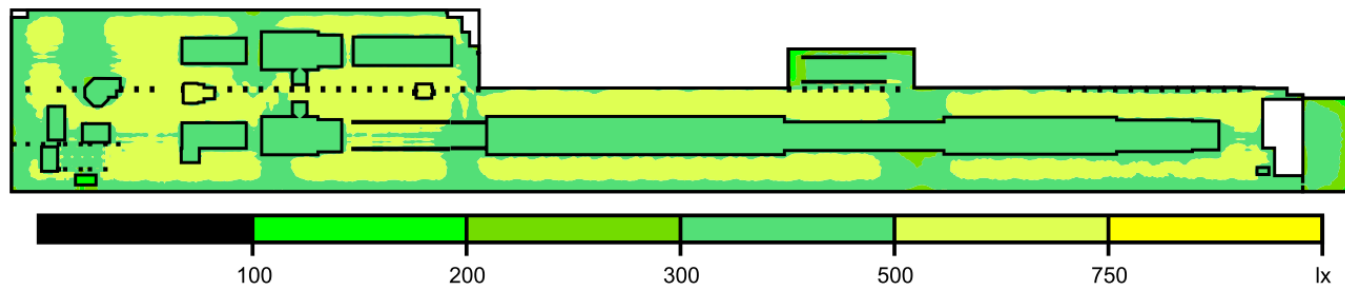
### G.1 Paperisali PK3



Kuva G1: Valaisinten A ja E paikat ratkaisussa 1.

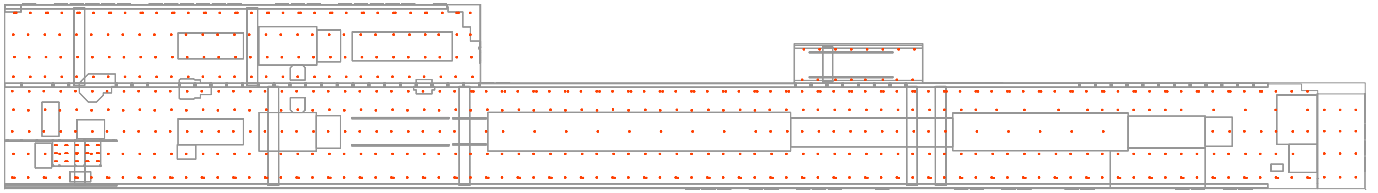


(a) 100 % teho

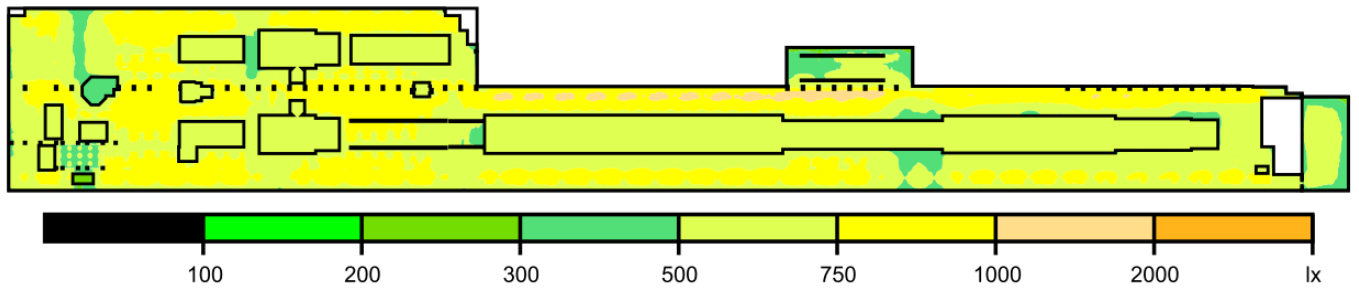


(b) 80 % teho

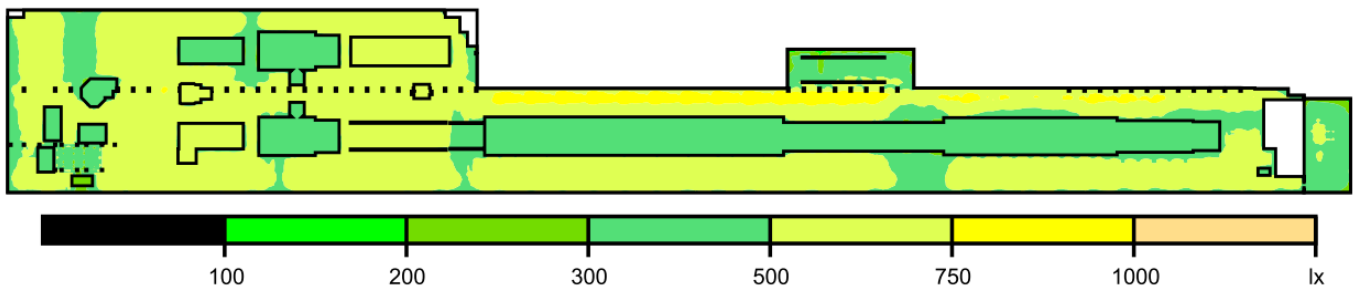
Kuva G2: Laskelman tulokset ratkaisussa 1 (a) täydellä teholla ja (b) 80 % teholla.



Kuva G3: Valaisinten B ja F paikat ratkaisussa 2.

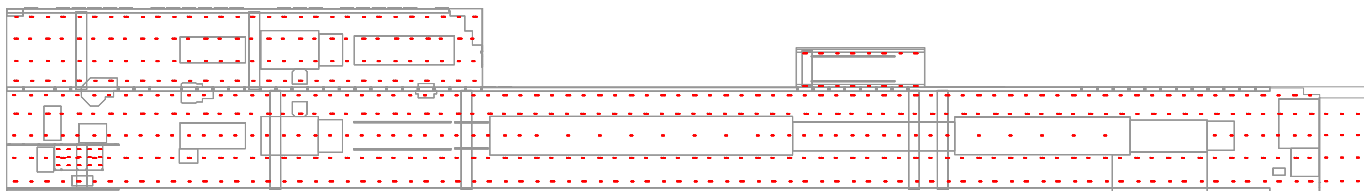


(a) 100 % teho

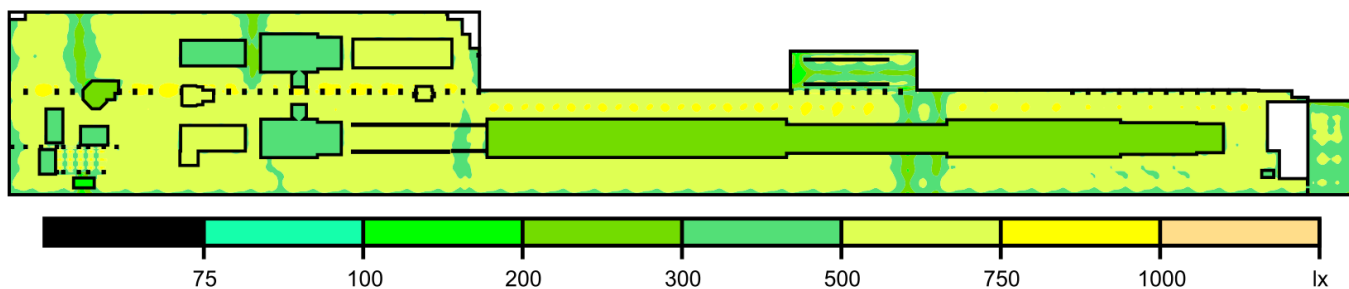


(b) 80 % teho

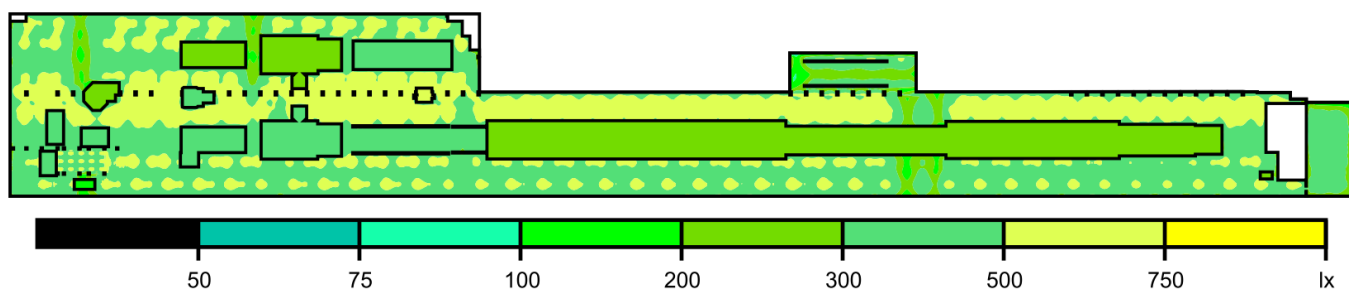
Kuva G4: Laskelman tulokset ratkaisussa 2 (a) täydellä teholla ja (b) 80 % teholla.



Kuva G5: Valaisinten C, D ja G paikat ratkaisussa 3.



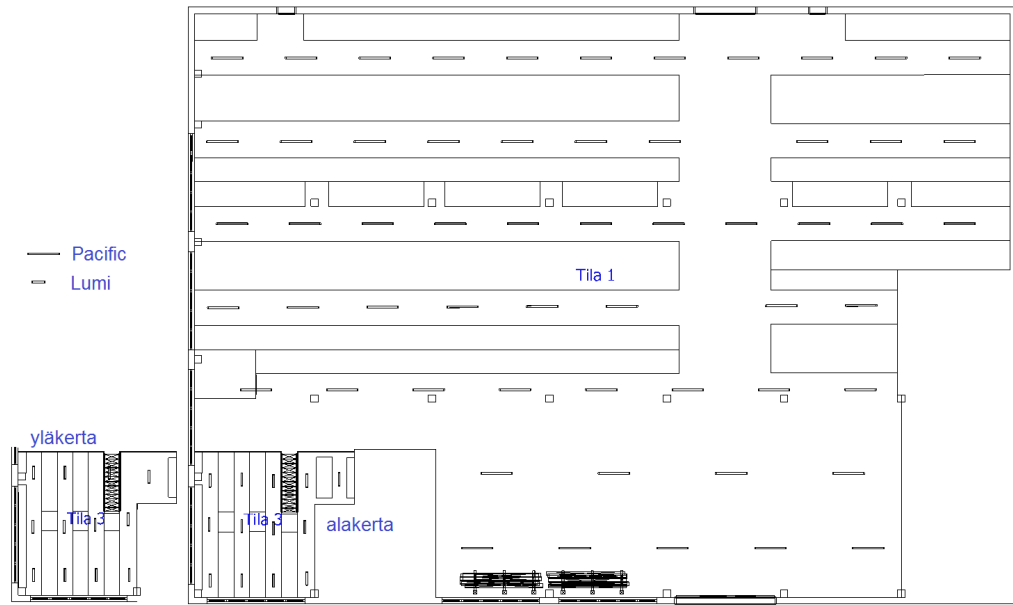
(a) 100 % teho



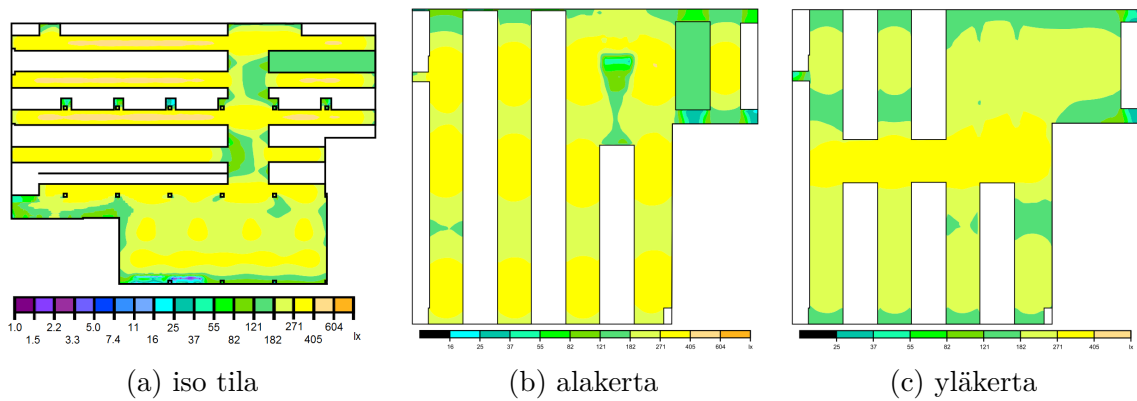
(b) 80 % teho

Kuva G6: Laskelman tulokset ratkaisussa 3 (a) täydellä teholla ja (b) 80 % teholla.

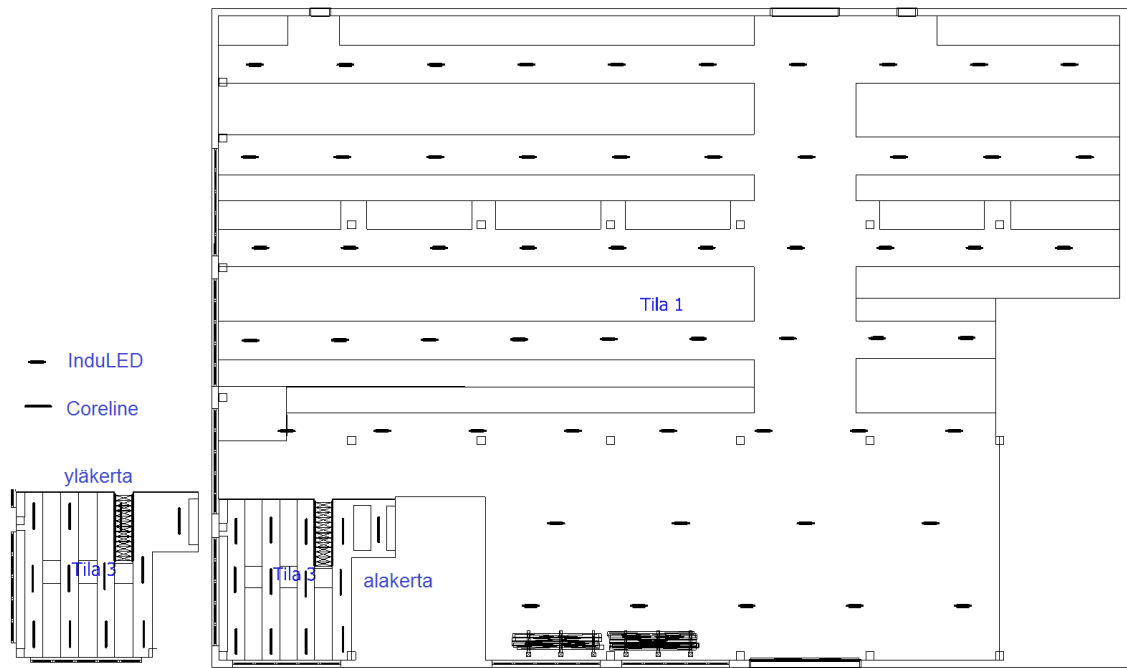
## G.2 Moottorivarasto



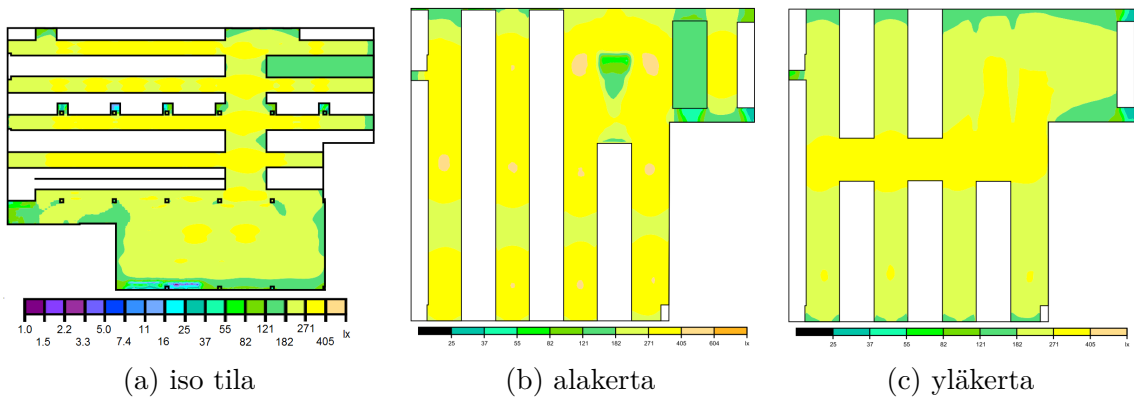
Kuva G7: Valaisinten paikat ratkaisussa 1.



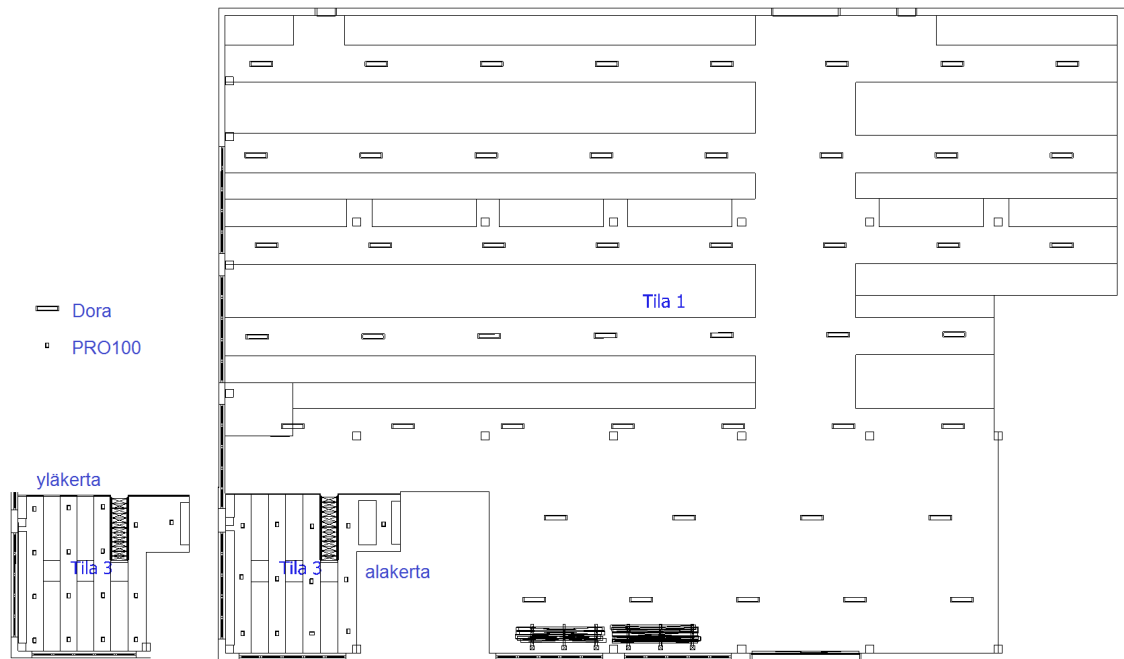
Kuva G8: Laskelman tulokset ratkaisussa 1 (a) isossa tilassa, pienen tilan (b) alakerrassa ja c) yläkerrassa.



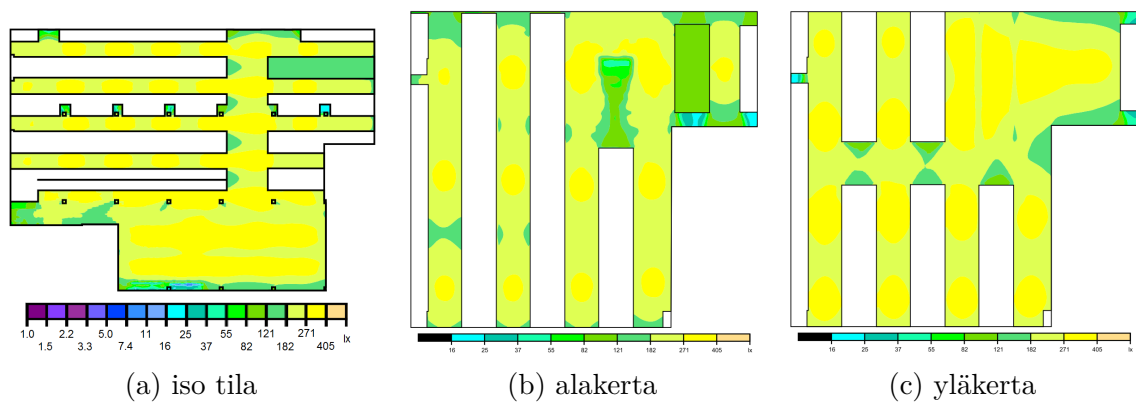
Kuva G9: Valaisinten paikat ratkaisussa 2.



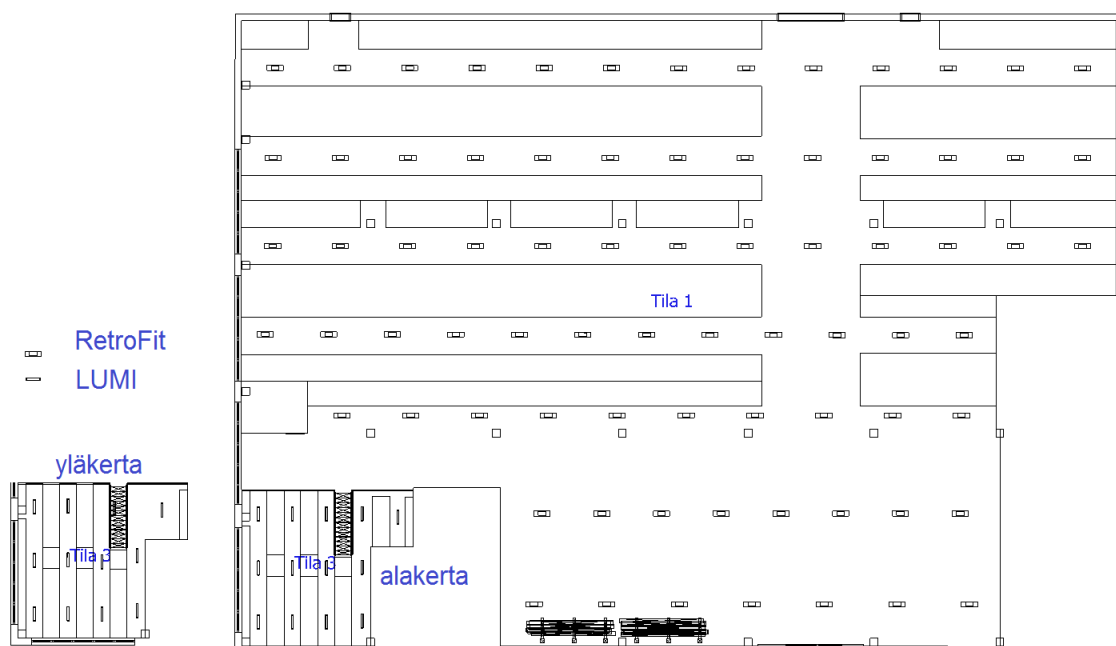
Kuva G10: Laskelman tulokset ratkaisussa 2 (a) isossa tilassa, pienen tilan (b) alakerrassa ja (c) yläkerrassa.



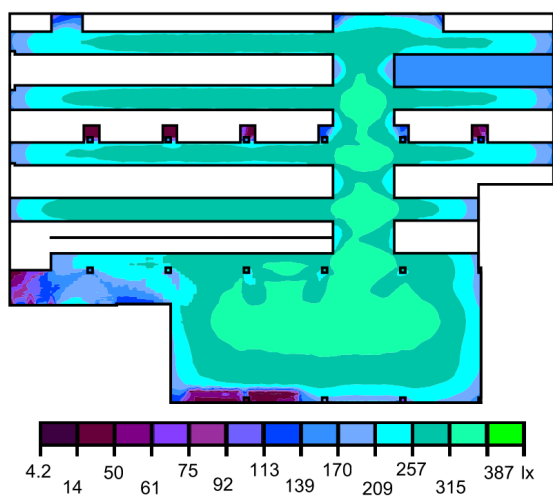
Kuva G11: Valaisinten paikat ratkaisussa 3.



Kuva G12: Laskelman tulokset ratkaisussa 3 (a) isossa tilassa, pienen tilan (b) alakerrassa ja (c) yläkerrassa.



Kuva G13: Valaisinten paikat RetroFit-ratkaisussa.



Kuva G14: Laskelman tulokset RetroFit-ratkaisussa isossa tilassa. Pienen tilan tulokset ovat samat kuin kuvassa G8 (b) ja (c).



# H Elinkaarikustannuslaskelmat

## H.1 Elinkaarikustannusten laskentataulukot

	PK3	GS	Vega	Pro	MV		Pacific	Leda	Induled	6721
	nykyinen	nyk. lask.	ratkaisu 1	ratkaisu 2	ratkaisu 3	nykyinen	nyk. ohjau	ratkaisu 1	ratkaisu 2	ratkaisu 3
	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
korkoprosentti i	199 320	199 320	825 000	772 500	442 570	5 700	10 700	20 162	15 640	18 680
investointi katto / iso tila [€]	1 500	1 500	3 990	3 750	2 850	1 300	1 300	3750	5450	4625
investointi hylsy / pieni tila [€]	200 820	200 820	828 990	776 250	445 420	7 000	12 000	23 912	21 090	23 305
investointikustannus yht. lo [€]	159 905,8	159 905,8	51 797,9	90 816,6	59 671,2	6 014,3	1 002,4	187,7	186,2	236,9
energia katto / iso [€]	817,3	817,3	296,4	345,3	299,3	1 371,7	228,6	33,6	32,0	24,0
energia hylsy / pieni [€]	19 932	49 830	20 625	22 660	10 900	950	380	570	560	570
huolto katto / iso [€/vuosi]	500	500	188	250	250	217	87	250	250	250
huolto hylsy / pieni [€/vuosi]	181 155,1	211 053,1	72 906,8	114 071,9	71 120,5	8 552,7	1 697,7	1 041,3	1 028,2	1 080,9
vuoden käyttökustannukset yht. Cn [€]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
vuosien määrä N	49 830	49 830	206 250	193 125	110 643	1 425	2 675	5 041	3 910	4 670
jaännosarvo katto/iso R [€]	375	375	998	938	713	325	325	938	1 363	1 156
jaännosarvo hylsy/pieni R [€]	50 205	50 205	207 248	194 063	111 355	1 750	3 000	5 978	5 273	5 826
jaännosarvo R [€]	3 324 445	3 841 442	2 140 930	2 794 285	1 697 003	126 566	35 429	34 818	29 749	34 073
NA - katto/iso	24 394	24 394	12 665	14 333	12 568	28 866	6 852	8 943	10 746	9 720
NA - hylsy/pieni	3 348 839	3 865 836	2 153 595	2 808 618	1 709 571	155 433	42 281	43 761	40 495	43 792
NA										
takaisinmaksuaika			9,33	15,85	4,50			3,47	3,03	3,40
laskennalliseen verrattuna			7,00	9,84	3,47					
takaisinmaksuaika iso								3,55	2,70	3,30
takaisinmaksuaika pieni								3,11	4,65	3,87
										3,11

Kuva H1: Nykyarvomenetelmän Excel-laskentataulukko.

vuosi	kpl	Nimellisteho [W]	Ottoteho yht [W]	käyttötunnit /vuosi	kWh/a	kerroin	Sähköhinta [€/kWh]	Energian hinta €/a	valaisimien hinta [€]	ohjaus [€]	asennus-kustannukset [€]	huolto (sis. lamput) [€]	kustannukset vuodessa [€]	kumulatiiviset kustannukset [€]
1	750	180	135 000	8 760	1 182 600		0,0438	51 797,9	712 500		112 500		876 798	876 798
2	gentlespac	180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0447	52 833,8					52 834	929 632
3		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0456	53 890,5					53 891	983 522
4		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0465	54 968,3					54 968	1 038 491
5		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0474	56 067,7					56 068	1 094 558
6		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0484	57 189,0					57 189	1 151 747
7		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0493	58 332,8					58 333	1 210 080
8		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0503	59 499,5					59 499	1 269 580
9		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0513	60 689,5				191 400	252 089	1 521 669
10		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0523	61 903,3					61 903	1 583 572
11		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0534	63 141,3					63 141	1 646 714
12		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0545	64 404,2					64 404	1 711 118
13		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0555	65 692,2					65 692	1 776 810
14		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0567	67 006,1					67 006	1 843 816
15		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0578	68 346,2					68 346	1 912 162
16		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0589	69 713,1					69 713	1 981 875
17		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0601	71 107,4				222 024	293 131	2 275 007
18		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0613	72 529,5					72 530	2 347 536
19		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0626	73 980,1					73 980	2 421 517
20		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0638	75 459,7					75 460	2 496 976
21		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0651	76 968,9					76 969	2 573 945
22		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0664	78 508,3					78 508	2 652 453
23		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0677	80 078,5					80 078	2 732 532
24		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0691	81 680,0					81 680	2 814 212
25		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0704	83 313,6				257 548	340 861	3 155 073
26		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0719	84 979,9					84 980	3 240 053
27		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0733	86 679,5					86 680	3 326 733
28		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0748	88 413,1					88 413	3 415 146
29		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0763	90 181,4					90 181	3 505 327
30		180	135 000	8 760	1 182 600	1,02	0,0778	91 985,0					91 985	3 597 312

Kuva H2: Kumulatiivisten kustannusten Excel-laskentataulukko paperisalin ratkaisun 1 (GentleSpace) kattovalaisimille. Muille ratkaisuille on käytetty vastaavaa taulukkoa.

vuosi	kpl	Nimellisteho [W]	Ottoteho yht [W]	käyttötunnit /vuosi	kWh/a	kerroin	Sähköhinta [€/kWh]	Energian hinta €/a	valaisimien hinta [€]	ohjaus [€]	asennus-kustannukset [€]	huolto (sis.lamput) [€]	kustannukset vuodessa [€]	kumulatiiviset kustannukset [€]
1	15	51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0438	296.4	3 240		750		4 286	4 286
2	Pacific	51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0447	302.3					302	4 589
3		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0456	308.4					308	4 897
4		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0465	314.5					315	5 212
5		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0474	320.8					321	5 532
6		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0484	327.2					327	5 860
7		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0493	333.8					334	6 194
8		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0503	340.5					340	6 534
9		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0513	347.3				1 740	2 087	8 621
10		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0523	354.2					354	8 975
11		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0534	361.3					361	9 337
12		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0545	368.5					369	9 705
13		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0555	375.9					376	10 081
14		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0567	383.4					383	10 465
15		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0578	391.1					391	10 856
16		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0589	398.9					399	11 255
17		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0601	406.9				2 018	2 425	13 680
18		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0613	415.0					415	14 095
19		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0626	423.3					423	14 518
20		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0638	431.8					432	14 950
21		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0651	440.4					440	15 391
22		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0664	449.2					449	15 840
23		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0677	458.2					458	16 298
24		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0691	467.4					467	16 765
25		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0704	476.7				2 341	2 818	19 583
26		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0719	486.3					486	20 070
27		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0733	496.0					496	20 566
28		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0748	505.9					506	21 072
29		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0763	516.0					516	21 588
30		51.5	772.5	8760	6767	1.02	0.0778	526.4					526	22 114

Kuva H3: Kumulatiivisten kustannusten Excel-laskentataulukko paperisalin ratkaisun 1 (Pacific) hylsyvaraston valaisimille. Muille ratkaisuille on käytetty vastaavaa taulukkoa.

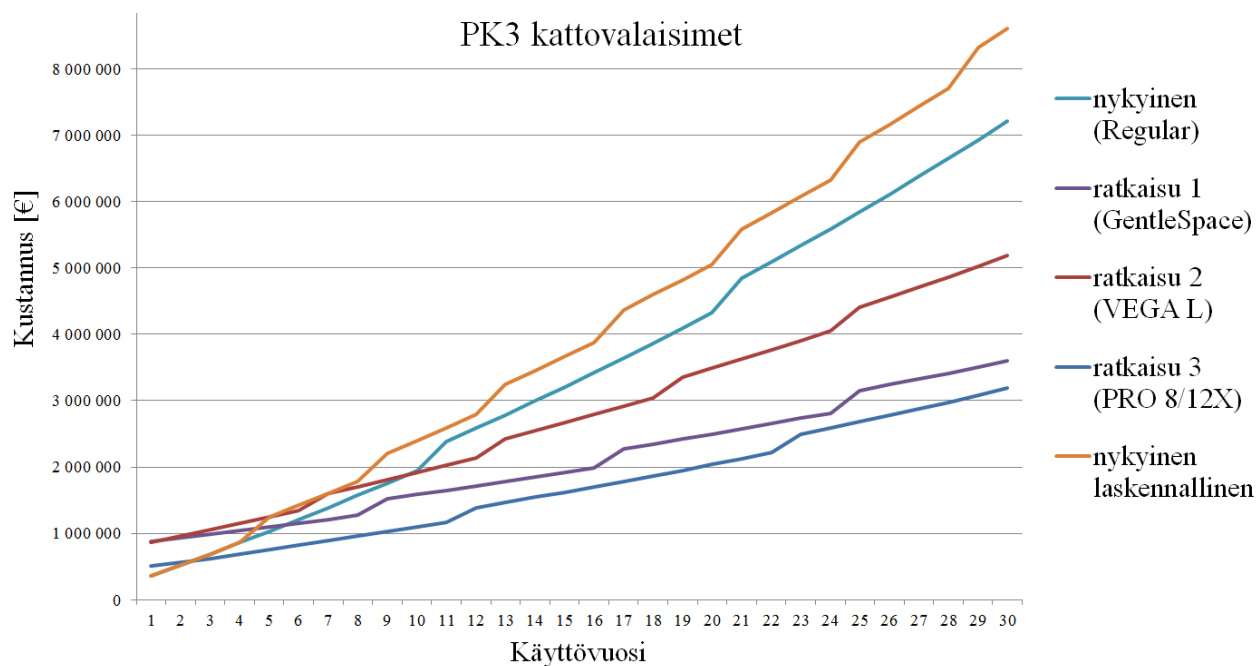
vuosi	kpl	Nimellisteho [W]	Ottoteho yht [W]	käyttötunnit /vuosi	kWh/a	kerroin	Sähkön hinta [€/kWh]	Energian hinta €/a	valaisimien hinta [€]	ohjaus [€]	asennus-kustannukset [€]	huolto (sis.lamput) [€]	kustannukset vuodessa [€]	kumulatiiviset kustannukset [€]
1	56	52	2 912	1 460	4 251,5		0,0438	186,2	7 840	5 000	2 800		15 826	15 826
2	Induled	52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0447	189,9					190	16 016
3		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0456	193,7					194	16 210
4		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0465	197,6					198	16 408
5		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0474	201,6					202	16 609
6		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0484	205,6					206	16 815
7		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0493	209,7					210	17 024
8		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0503	213,9					214	17 238
9		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0513	218,2					218	17 456
10		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0523	222,5					223	17 679
11		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0534	227,0					227	17 906
12		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0545	231,5					232	18 138
13		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0555	236,2					236	18 374
14		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0567	240,9					241	18 615
15		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0578	245,7					246	18 860
16		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0589	250,6				10 920	11 171	30 031
17		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0601	255,6					256	30 287
18		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0613	260,7					261	30 547
19		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0626	266,0					266	30 813
20		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0638	271,3					271	31 085
21		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0651	276,7					277	31 361
22		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0664	282,2					282	31 644
23		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0677	287,9					288	31 931
24		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0691	293,6					294	32 225
25		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0704	299,5					300	32 525
26		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0719	305,5					306	32 830
27		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0733	311,6					312	33 142
28		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0748	317,9					318	33 460
29		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0763	324,2					324	33 784
30		52	2 912	1 460	4 251,5	1,02	0,0778	330,7					331	34 114

Kuva H4: Kumulatiivisten kustannusten Excel-laskentataulukko moottorivaraston ratkaisun 1 (InduLED) ison tilan valaisimille. Muille ratkaisuille on käytetty vastaavaa taulukkoa.

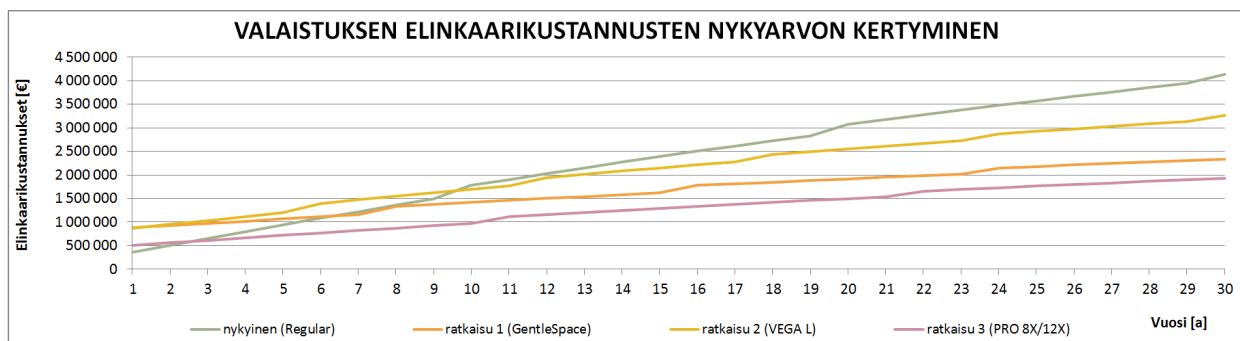
vuosi	kpl	Nimellisteho [W]	Ottoteho yht [W]	käyttötunnit /vuosi	kWh/a	kerroin	Sähkön hinta [€/kWh]	Energian hinta €/a	valaisimien hinta [€]	ohjaus [€]	asennus-kustannukset [€]	huolto (sis.lamput) [€]	kustannukset vuodessa [€]	kumulatiiviset kustannukset [€]
1	25	20	500	1 460	730	1,02	0,0438	32,0	4 200		1 250		5 482	5 482
2	Coreline	20	500	1 460	730	1,02	0,0447	32,6					33	5 515
3		20	500	1 460	730	1,02	0,0456	33,3					33	5 548
4		20	500	1 460	730	1,02	0,0465	33,9					34	5 582
5		20	500	1 460	730	1,02	0,0474	34,6					35	5 616
6		20	500	1 460	730	1,02	0,0484	35,3					35	5 652
7		20	500	1 460	730	1,02	0,0493	36,0					36	5 688
8		20	500	1 460	730	1,02	0,0503	36,7					37	5 724
9		20	500	1 460	730	1,02	0,0513	37,5					37	5 762
10		20	500	1 460	730	1,02	0,0523	38,2					38	5 800
11		20	500	1 460	730	1,02	0,0534	39,0					39	5 839
12		20	500	1 460	730	1,02	0,0545	39,8					40	5 879
13		20	500	1 460	730	1,02	0,0555	40,6					41	5 919
14		20	500	1 460	730	1,02	0,0567	41,4					41	5 961
15		20	500	1 460	730	1,02	0,0578	42,2					42	6 003
16		20	500	1 460	730	1,02	0,0589	43,0				4 875	4 918	10 921
17		20	500	1 460	730	1,02	0,0601	43,9					44	10 965
18		20	500	1 460	730	1,02	0,0613	44,8					45	11 010
19		20	500	1 460	730	1,02	0,0626	45,7					46	11 055
20		20	500	1 460	730	1,02	0,0638	46,6					47	11 102
21		20	500	1 460	730	1,02	0,0651	47,5					48	11 149
22		20	500	1 460	730	1,02	0,0664	48,5					48	11 198
23		20	500	1 460	730	1,02	0,0677	49,4					49	11 247
24		20	500	1 460	730	1,02	0,0691	50,4					50	11 298
25		20	500	1 460	730	1,02	0,0704	51,4					51	11 349
26		20	500	1 460	730	1,02	0,0719	52,5					52	11 402
27		20	500	1 460	730	1,02	0,0733	53,5					54	11 455
28		20	500	1 460	730	1,02	0,0748	54,6					55	11 510
29		20	500	1 460	730	1,02	0,0763	55,7					56	11 565
30		20	500	1 460	730	1,02	0,0778	56,8					57	11 622

Kuva H5: Kumulatiivisten kustannusten Excel-laskentataulukko moottorivaraston ratkaisun 1 (CoreLine) pienen tilan valaisimille. Muille ratkaisuille on käytetty vastaavaa taulukkoa.

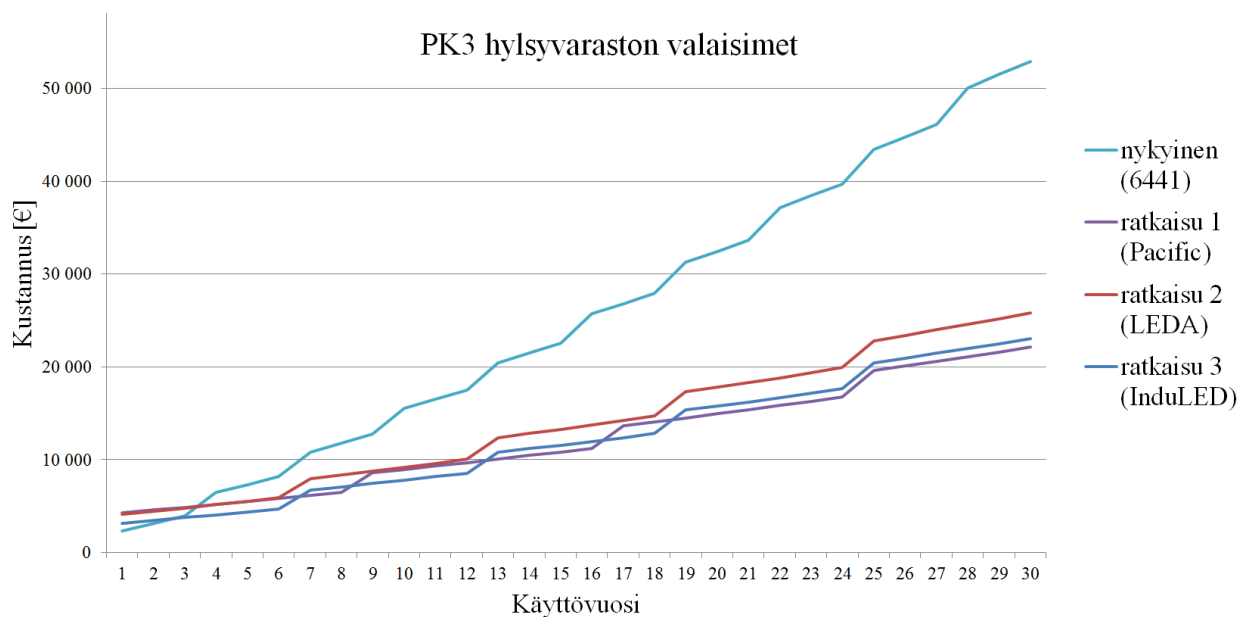
## H.2 Tulokuvaajat - Paperisali PK3



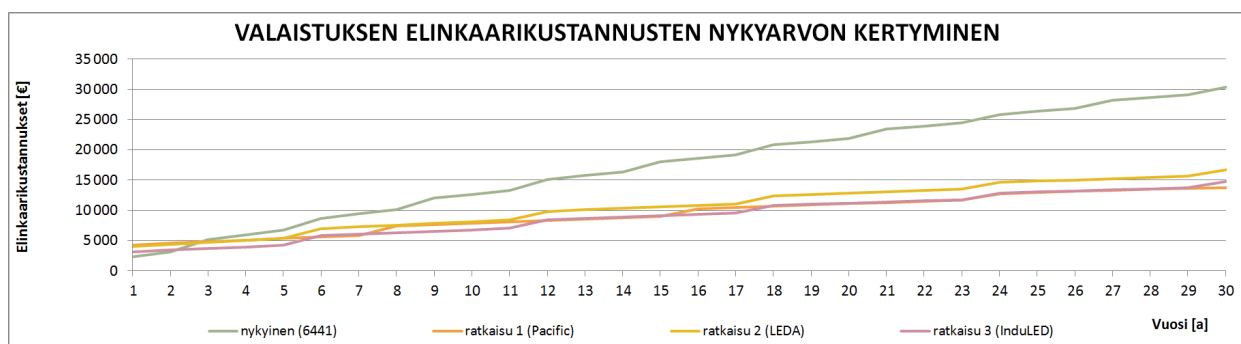
Kuva H6: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen paperisalin kattovalaisimille suoraan Excelillä laskettuna.



Kuva H7: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen paperisalin kattovalaisimille VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla laskettuna.

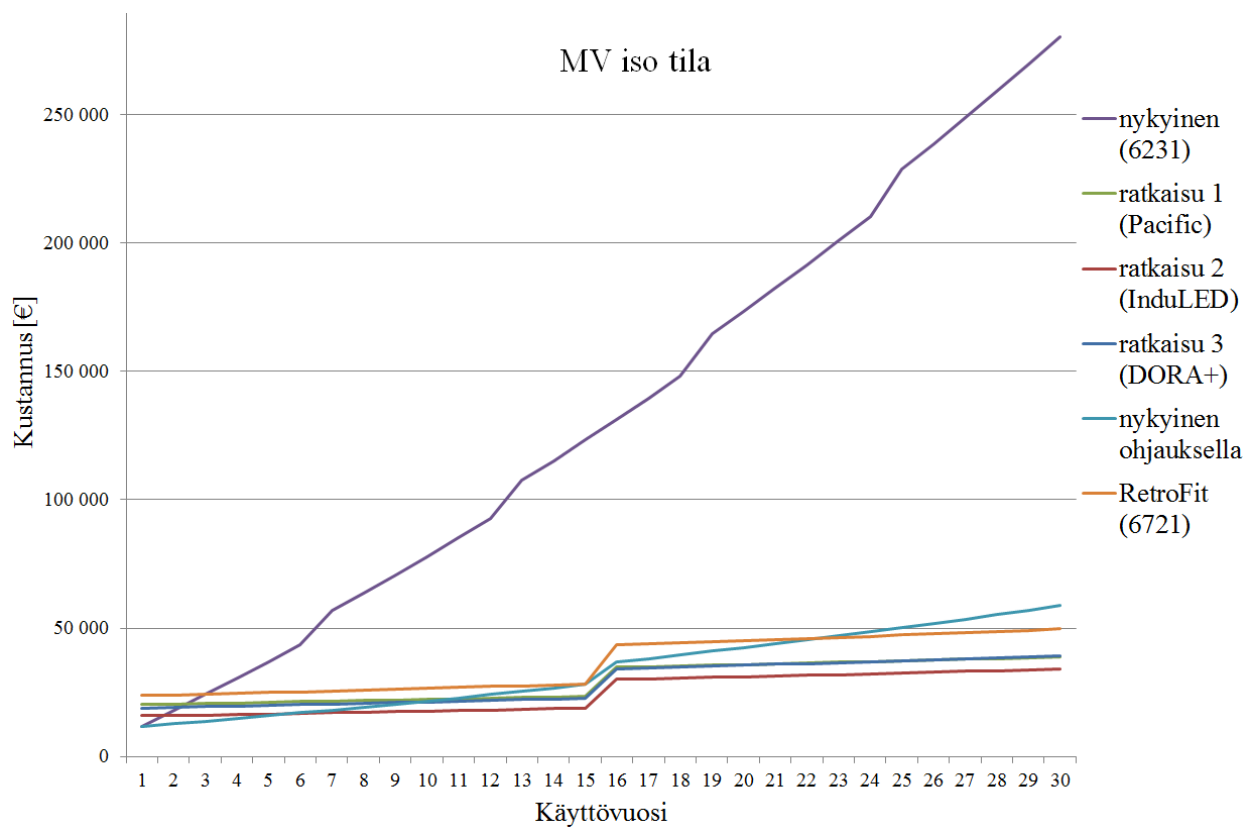


Kuva H8: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen paperisalin hylsyvaraston valaisimille suoraan Excelillä laskettuna.



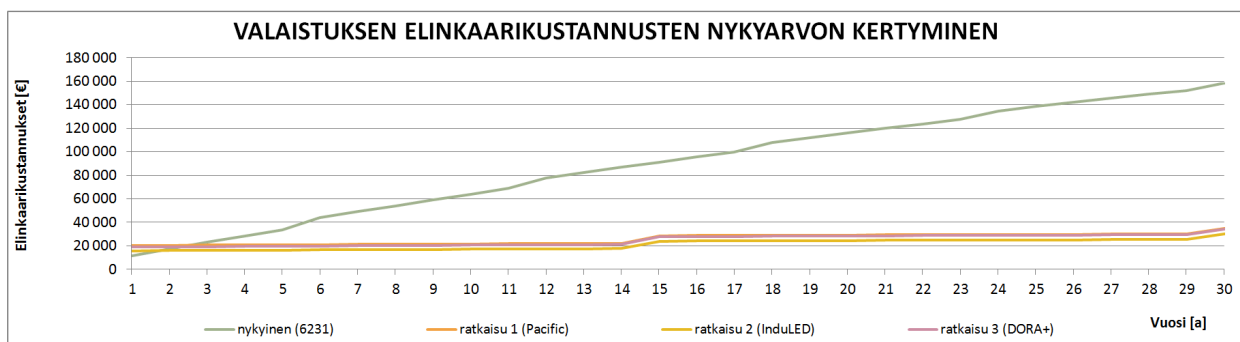
Kuva H9: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen paperisalin hylsyvaraston valaisimille VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla laskettuna.

### H.3 Tulokuvajaajat - Moottorivarasto

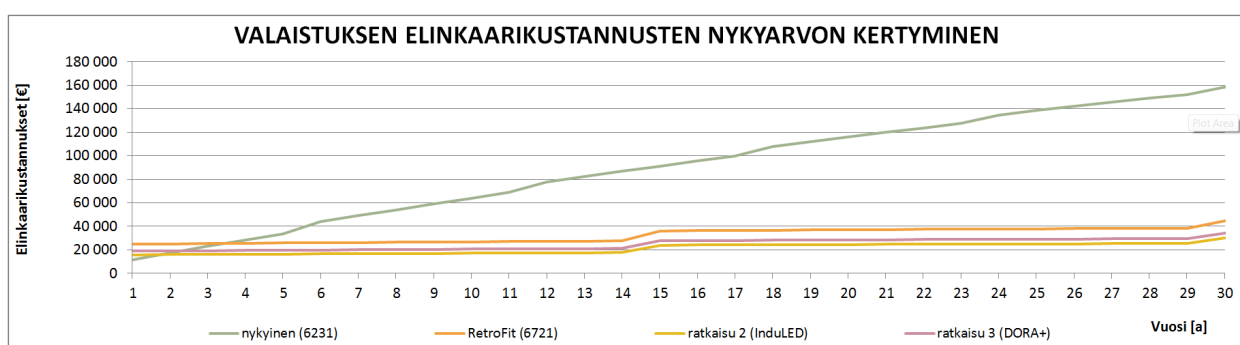


Kuva H10: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen moottorivaraston ison tilan valaisimille suoraan Excelillä laskettuna.

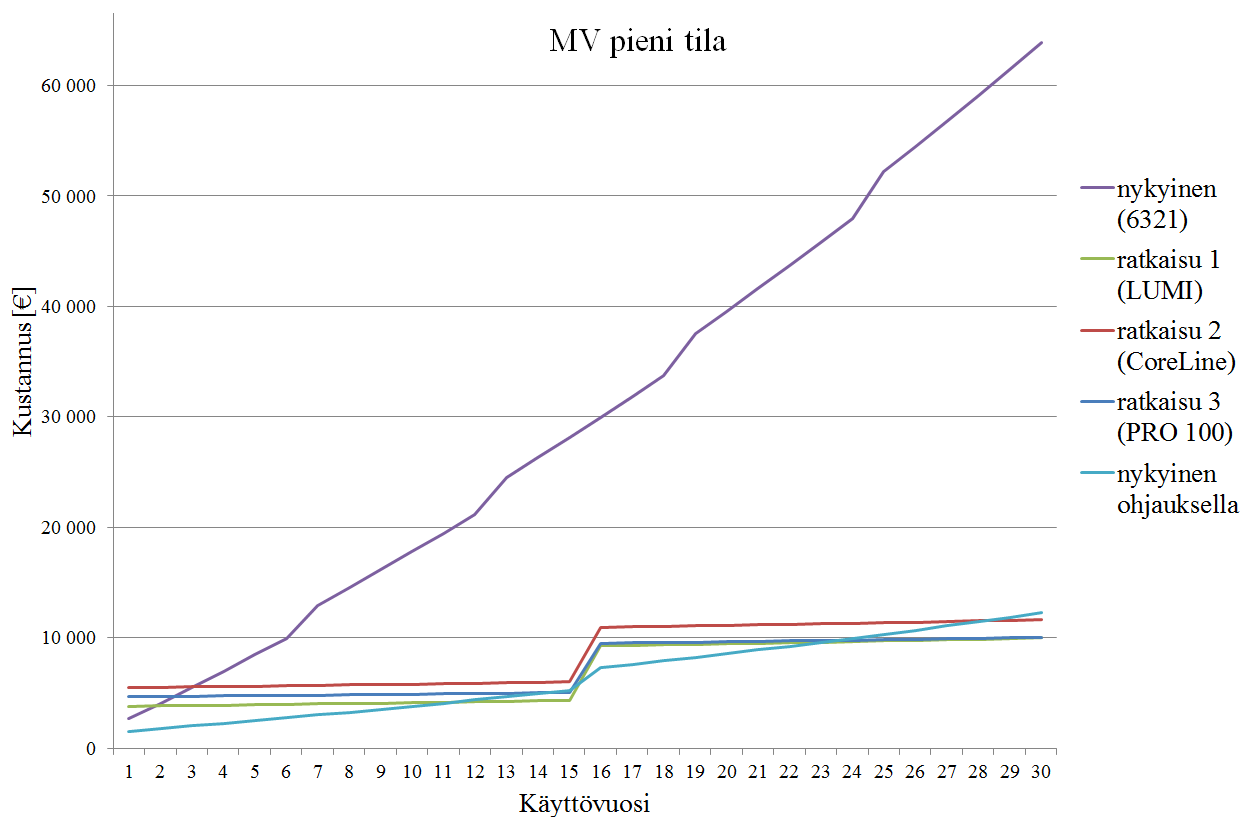




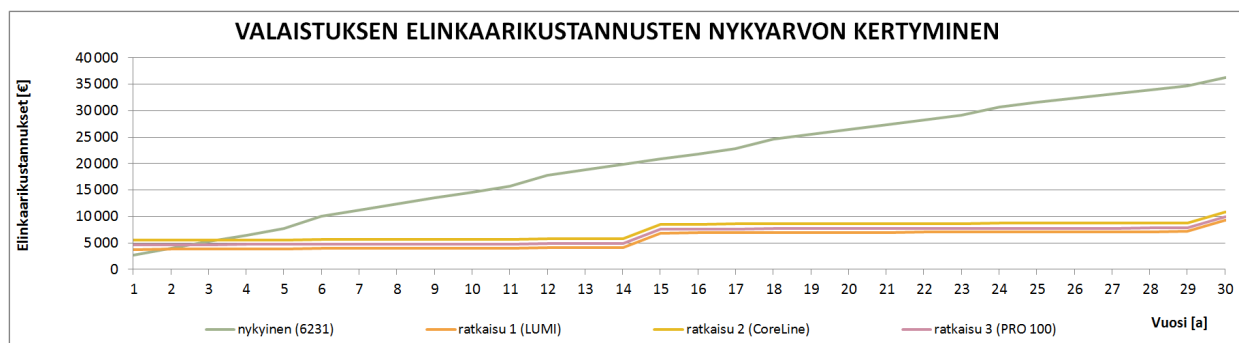
Kuva H11: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen moottorivaraston ison tilan valaisimille VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla laskettuna.



Kuva H12: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen moottorivaraston ison tilan valaisimille VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla laskettuna, kun RetroFit on ratkaisun 1 tilalla.



Kuva H13: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen moottorivaraston pienen tilan valaisimille suoraan Excelillä laskettuna.



Kuva H14: Elinkaarikustannusten nykyarvon kertyminen moottorivaraston pienen tilan valaisimille VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla laskettuna.